



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**VÍŘÍVÉ ČERPADLO, JAKO NÁHRADA UMĚLÉHO
SRDCE**

SWIRL PUMP AS AN ARTIFICIAL HEART REPLACEMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ludmila Čápková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. František Pochylý, CSc.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Bc. Ludmila Čápková**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Fluidní inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. František Pochylý, CSc.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vířivé čerpadlo, jako náhrada umělého srdce

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bude navržena konstrukční varianta čerpadla s diskovým motorem. Čerpadlo bude řešeno ve dvoustupňové variantě s ohledem na minimum degradace krevních destiček. Potřebné díly čerpadla budou vyrobeny na 3D tiskárně. U čerpadla bude změřena výkonová charakteristika v závislosti na otáčkách. Výsledky budou vyhodnoceny a navržena výsledná konstrukční varianta.

Cíle diplomové práce:

Ideový návrh dvoustupňového vířivého čerpadla.
Výpočtové modelování proudění v interiéru čerpadla.
Konstrukční návrh čerpadla.
Laboratorní ověření charakteristiky čerpadla.

Seznam doporučené literatury:

JANDOUREK, Pavel. Ventil na principu vířivé turbíny. Brno, 2017. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Odbor fluidního inženýrství V. Kaplana. Vedoucí práce František Pochylý.

COUFALÍK, Martin. Vířivé čerpadlo jako možná srdeční náhrada. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Odbor fluidního inženýrství V. Kaplana. Vedoucí práce Simona Fialová.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 27. 10. 2017



doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je navázání na výzkum vířivého čerpadla z předchozích let a jeho optimalizaci, skrze kterou je navržen druhý stupeň synchronního čerpadla, přičemž dohromady mají fungovat jako totální srdeční náhrada. Je řešen hydraulický i konstrukční návrh. Koncepce je realizována jak experimentálně, tak také pomocí CFD výpočtů, výsledky jsou navzájem porovnány.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vířivé čerpadlo, umělé srdce, optimalizace, charakteristika čerpadla

ABSTRACT

The purpose of the diploma thesis is to establish on survey of swirl pump from previous years and his optimization via which is suggested the second degree of synchronous pump whereas they should work together like a total artificial heart. Hydraulic and constructional proposal is solved. Conception is realized experimentally also with help of CFD calculation, results are compared with each other.

KEYWORDS

Swirl pump, artificial heart, optimization, pump performance curve

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČÁPOVÁ, L. *Vířivé čerpadlo, jako náhrada umělého srdce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 85 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. František Pochylý, CSc..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Františka Pochylého, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2018

.....

Bc. Ludmila Čápová

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu prof. Ing. Františkovi Pochylému, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce, všem pracovníkům Hydraulické laboratoře za zhotovení experimentů, panu doc. Ing. Josefovi Sedlákov, Ph.D. a panu Ing. Janovi Vetiškovi, Ph.D. za výrobu součástí a panu Ing. Davidovi Štefanovi, Ph.D. za věcné informace ohledně CFD výpočtů.

OBSAH

Úvod	15
1 Typy čerpadel	16
1.1 Hydrodynamická čerpadla	17
1.1.1 Odstředivá čerpadla	17
1.1.2 Axiální čerpadla	18
1.1.3 Vířivá čerpadla	18
1.2 Hydrostatická čerpadla	20
1.2.1 Membránová čerpadla	21
1.2.2 Peristaltická čerpadla	22
2 Totální srdeční náhrady	23
2.1 SynCardia TAH	23
2.2 AbioCoR TAH	24
2.3 CFTAH	25
2.4 Carmat TAH	25
2.5 BiVACOR TAH	26
2.6 HFTAH	27
2.7 BiVAD	27
2.7.1 CorAide a DexAide	27
2.7.2 Jarvik 2000 Flow Maker	28
2.7.3 DuraHeart	28
2.7.4 HeartMate II	28
2.7.5 HeartWare (HVAD)	29
2.7.6 EXCOR	29
2.7.7 INCOR	30
2.7.8 Heart Assist 5	30
2.7.9 Thoratec CentriMag, Thoratec PediVAS	31
2.7.10 HeartMate III	31
2.8 Výzkum našeho odboru	32
3 Počáteční experiment	34
3.1 Měřicí trať	34
3.2 Měřené veličiny	35
3.3 Měřicí technika	35
3.4 Vypočítané veličiny	35
3.5 Výpočetní vztahy	36
3.6 Vyhodnocení	36
3.6.1 První varianta	37

3.6.2	Druhá varianta.....	38
4	Hydraulický návrh oběžného kola vířivého čerpadla	40
4.1	Úvod.....	40
4.2	Oběžné kolo levého čerpadla	40
4.3	Oběžné kola pravého čerpadla	41
5	Konstrukční návrh oběžných kol vířivého čerpadla	44
5.1	Motor čerpadla	44
5.2	Oběžná kola.....	45
5.3	Návrhy upnutí oběžných kol k rotoru motoru	46
5.4	Finální návrh upnutí	49
5.4.1	Pevnostní výpočty	50
5.5	Ideový návrh.....	52
6	CFD výpočet	54
6.1	Model	54
6.2	Výpočetní síť	54
6.3	Okrajové podmínky.....	54
6.4	Stacionární výpočet	55
6.5	Nestacionární výpočet	55
6.6	Výsledky.....	55
6.7	Zhodnocení.....	60
7	Závěrečný experiment	62
7.1	Měřicí trať	62
7.2	Měřené veličiny.....	63
7.3	Měřicí technika.....	63
7.4	Vypočítané veličiny.....	64
7.5	Výpočetní vztahy.....	64
7.6	Vyhodnocení	64
7.7	Srovnání experimentu s CFD výpočtem	70
	Závěr.....	71
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	76
	Seznam použitých obrázků	78
	Seznam použitých grafů	81
	Seznam příloh.....	82

Úvod

Ačkoliv by se mohlo zdát, že nejen českou, ale i evropskou populaci sužuje poslední dobou nejvíce onemocnění onkologického charakteru, není tomu tak. Nejčastější příčinou smrti člověka jak v České republice, tak také v rámci Evropské unie, je selhání srdce. Častěji dochází k srdečním chorobám i smrti u mužů než u žen, přesto se podíl úmrtí tímto způsobem poslední roky redukuje. [39]

Historie výzkumu umělých srdcí se datuje již od poloviny 20. století. Nejvíce se tomuto tématu věnují vědci z USA, Francie, Německa, Japonska a Česka. Snaží se aplikovat oba základní typy čerpadel – hydrodynamická i hydrostatická. Poslední roky jsou nejvíce vyvíjena hydrodynamická čerpadla, konkrétně odstředivá, jenž jsou zároveň bezpulzní čerpadla.

Proudění krve v cévách lze považovat za nevířivé, to však neplatí o proudění v srdci, které můžeme brát jako vířivé. To znamená, že může být uvažováno využití vířivého čerpadla s ohledem na dodržení velmi nízkých smykových napětí. Proto se tímto řešením zabývá Odbor fluidního inženýrství Viktora Kaplana již řadu let.

Diplomová práce se skládá z rešerše, která je zaměřena na umělá srdce a podpory používané nebo vyvíjené poslední roky. Následuje měření přechozího modelu vířivého čerpadla na našem odboru, z jehož výsledků je vycházeno při hydraulickém i konstrukčním návrhu jak u druhého stupně čerpadla, tak i u celkové koncepce synchronního čerpadla. Charakteristiky čerpadla budou naměřeny a vyhodnoceny v závěrečném experimentu, srovnány s CFD výpočty a s parametry fyziologického lidského srdce. Dvoustupňové čerpadlo má být poháněno diskovým motorem, jehož prototyp bude sestaven a zprovozněn do závěrečného experimentu, aby byly přeměřeny jeho výkonové charakteristiky v závislosti na otáčkách.

1 TYPY ČERPADEL

Nejdříve budou hlavní typy čerpadel rozděleny v následujícím obrázku (obrázek 1) podle fyzikální podstaty a v následujících podkapitolách budou popsány jen ta čerpadla, která se používají jako možné náhrady nebo podpory lidského srdce. [5]

Čerpadla	Axiální	
	Odstředivá	<ul style="list-style-type: none"> - Radiální - Diagonální
Hydrodynamická	Speciální	<ul style="list-style-type: none"> - Mamutová - Proudová - Vodní trkač - PITOT čerpadlo - Disková - Vířivá - Volná vířivá - Válcové otvory - Jiné
	S kmitavým pohybem	<ul style="list-style-type: none"> - Membránová - Plunžrová - Pístová
	Rotační	<ul style="list-style-type: none"> - Jeden rotor <ul style="list-style-type: none"> •Lamelová •Excentrická pístová •Pružný rotor •Šroubová •Peristaltická - Více rotorů <ul style="list-style-type: none"> •Zubová •Rotačně pístová •Vřetenová •Jiná
	Speciální	<ul style="list-style-type: none"> - Elektrojiskrová - Elektromagnetická - Šneková (Archimédův šroub) - Jiná
Hydrostatická		

Obrázek 1: Rozdělení čerpadel [2], **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, [4][5], [6]

Čerpadla jsou obecně hydraulické stroje, které přeměňují mechanickou energii na energii hydraulickou. Ta se skládá z energie kinetické, potenciální a tlakové. Pokud se mění větší část mechanické energie stroje v kinetickou energii, jedná se o hydrodynamická čerpadla, zatímco u hydrostatických čerpadel převládá transformace mechanické energie v energii potenciální. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, [5], [6]

1.1 HYDRODYNAMICKÁ ČERPADLA

Transport energií probíhá nepřímým způsobem. Nejdříve se mechanická energie přemění na kinetickou energii kapaliny a z ní další energetickou přeměnou vzniká tlaková energie, tudíž tlak v čerpadle narůstá. [5], [6]

1.1.1 Odstředivá čerpadla

[25]

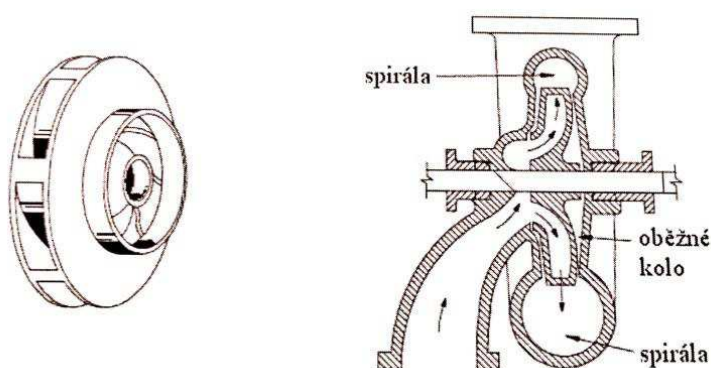
Jedinečným znakem odstředivých čerpadel je využití odstředivé síly při provozu. Kapalina je na oběžné kolo přiváděna axiálně, její směr proudění se změní v rotační pohyb skrze odstředivou sílu. Ta působí na tekutinu vlivem rotace oběžného kola s lopatkami, které usměrňují proudění kapaliny a vytlačují ji směrem ze středu ven do spirály. Rychlost proudění tekutiny se snižuje při pohybu ven z odstředivého čerpadla, a tak se kinetická energie přeměňuje na tlakovou.

Jsou vhodná pro čerpání velkých objemů, přestože nejsou schopna transportovat přesné množství tekutin, jelikož průtok je ovlivňován vícero faktory. Pracovní média mohou být tekutiny s nízkou nebo středně vysokou viskozitou či plyny. Tato čerpadla jsou citlivá na režim častého zapínání a vypínání, proto je optimální nechat je v provozu delší časový úsek. Maximální objem přečerpané kapaliny se pohybuje kolem $20\,000\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ při otáčkách $3\,000\text{ min}^{-1}$, maximální dopravní výška může dosahovat až 100 m.

Rozlišujeme radiální a diagonální čerpadla, odlišují se od sebe směrem proudění na výstupu.

RADIÁLNÍ ČERPADLA

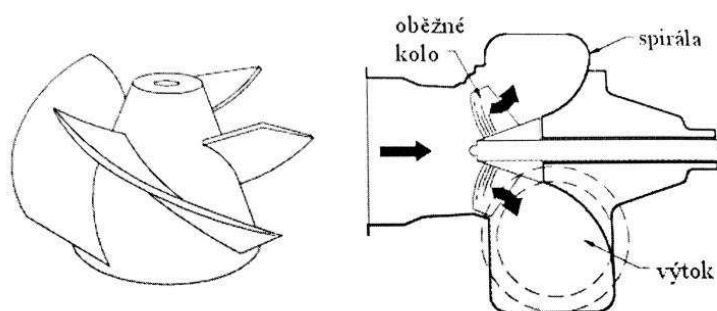
Na vstupu do radiálního čerpadla kapalina proudí axiálně, zatímco na výstupu z čerpadla má směr kolmý k ose otáčení.



Obrázek 2: Radiální čerpadlo [25]

DIAGONÁLNÍ ČERPADLA

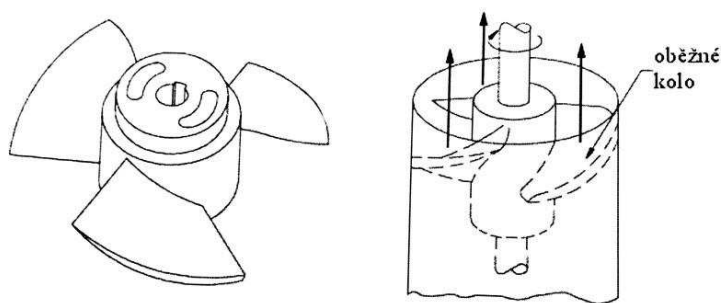
V sacím potrubí má kapalina stejný směr proudění jako u radiálních čerpadel, tedy axiální směr. Liší se skrze proudění na výtlaku, kde pracovní médium vystupuje diagonálně, tzn. pod jiným úhlem než 90° k ose rotace.



Obrázek 3: Diagonální čerpadlo [25]

1.1.2 AXIÁLNÍ ČERPADLA

Jde o čerpadla, ve kterých má proudící kapalina stejný směr na vstupu i výstupu, mnohdy se jim říká osová čerpadla. Jsou schopna pracovat při velkých průtocích, ale za cenu menších hodnot měrné energie, tudíž i menších dopravních výšek. Patří mezi nejrychloměnnější čerpadla. Lopatky jsou upevněny v náboji a jejich natočení se podle typu uložení může regulovat či nikoliv. Připomínají svojí konstrukcí Kaplanovu turbínu. Čerpadla jsou instalována na čerpání čisté, případně částečně znečištěné vody. [4], [25]



Obrázek 4: Axiální čerpadlo [25]

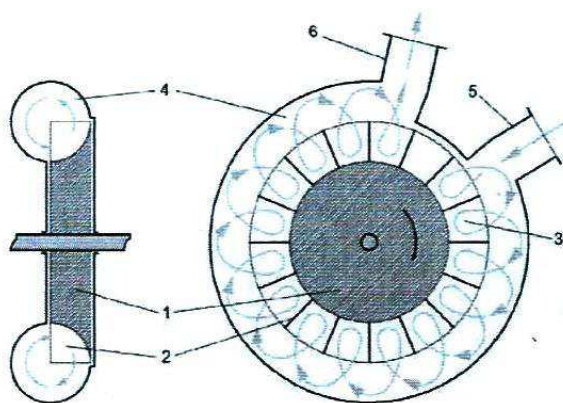
1.1.3 VÍŘIVÁ ČERPADLA

[2]

Vířivá čerpadla zařazujeme do skupiny speciálních hydrodynamických čerpadel, jelikož jsou založena na principech, odlišujících se od ostatních druhů čerpadel. Oběžné kolo je tvořeno radiálními lopatkami, mezi nimiž je prostor, který pracovní kapalina využívá ke vzniku lokálních (podélných) vírů. Právě toto vířivé proudění tekutiny je základním principem čerpadla.

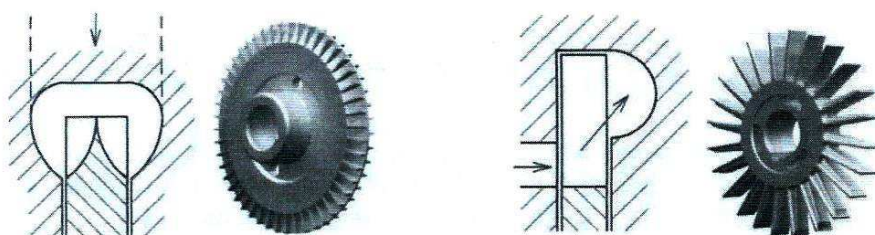
Na následujícím obrázku (obrázek 5) je znázorněno základní schéma vířivého čerpadla:

- 1 - Oběžné kolo
- 2 - Lopatky oběžného kola
- 3 - Mezilopátkové prostory
- 4 - Válcový kanál (spirála)
- 5 - Sání
- 6 - Výtlač



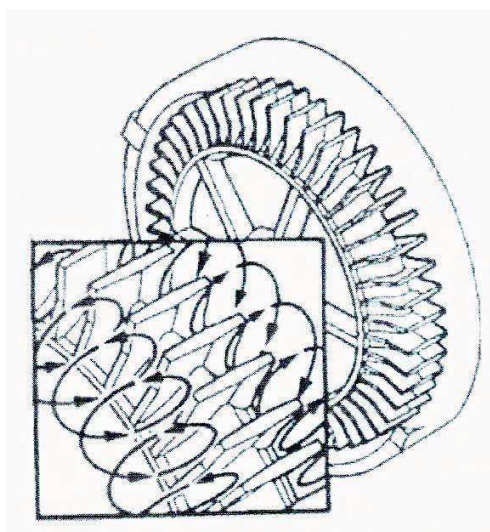
Obrázek 5: Schéma vířivého čerpadla [2]

Rozlišujeme dva základní typy oběžných kol vířivých čerpadel – uzavřené a otevřené (obrázek 6). Oběžná kola se mezi sebou liší zejména konstrukcí a délkou lopatek. V uzavřeném typu je přidán po jedné straně lopatek nebo uprostřed lopatek disk, zatímco otevřený typ je navrhován zcela bez disku. Delší lopatky jsou používány u otevřených oběžných kol, zatímco u uzavřených jsou lopatky kratší.



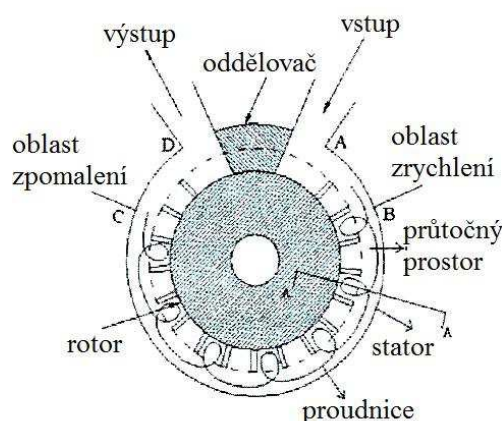
Obrázek 6: Typy oběžných kol vířivého čerpadla – vlevo uzavřené, vpravo otevřené [2]

Na obrázku 7 je zobrazeno prostorové proudění kapaliny ve vířivém čerpadle. Zde se jedná o otevřený typ oběžného kola, válcový kanál byl v tomto případě navrhnout z obou stran lopatek.



Obrázek 7: Typické proudění [2]

Pracovní proces vířivého čerpadla je stručně popsán na obrázku 8 a je založen na změně tlaku kapaliny. Kapalina je v místě sání vháněna do válcového kanálu, proudění je ovlivňováno tlakovou ztrátou, avšak poté se rychlost tekutiny zvyšuje – oblast A-B. V oblasti B-C nenastává další zrychlování kapaliny, naopak se rychlost proudění ustálí, tudíž je i tlakový spád konstantní. V tomto režimu je proudění plně rozvinuté, proto se také tato oblast nazývá jako pracovní část vířivého čerpadla. Další etapou pracovního procesu je oblast C-D neboli oblast zpomalení proudění. Tlak se zvyšuje, přičemž dochází k přeměně kinetické energie na tlak.



Obrázek 8: Pracovní proces [22]

Důležitým faktorem pro stanovení účinnosti čerpadla je hodnota celkových ztrát. Ta se stanovuje součtem ztrát pro překonání mechanických odporů, hydraulických ztrát vířivého proudění, tření, hydraulických ztrát na vstupu a výstupu a objemových ztrát, skládajících se ze ztrát způsobených únikem kapaliny skrze ucpávku a vnitřním průtokem mezi oblastí vysokého a nízkého tlaku. Účinnost těchto čerpadel dosahuje hodnot do 45 %, ale vyrábějí se s účinností od 35 % do 40 %. To je z hlediska ostatních hydraulických strojů velkým nedostatkem, což zamezuje rozsáhlejšímu použití. Při návrhu se dbá na hodnoty průtoku, které nepřesahují $12 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ a měrné energie, jež dosahuje maxima $2500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$. Výkon se pohybuje do 25 kW, specifické otáčky od 6 do 50 min^{-1} . Velikost otáček se volí tak, aby nevznikala kavitace. Celkově se vířivá čerpadla nedoporučují používat pro transport viskózních kapalin či kapalin s mechanickými příměsemi. Jednak se snižuje měrná energie a tudíž i hydraulická účinnost, ale především mechanické přísady podporují rychlé opotřebování funkčních částí stroje.

1.2 HYDROSTATICKÁ ČERPADLA

Přeměna mechanické energie v tlakovou probíhá přímo. Tlak v hydrostatickém čerpadle se zvyšuje vlivem vytlačování činného objemu kapaliny z pracovního prostoru díky mechanické součásti (píst, zub, lamela, šroub aj.). Proto jsou kvůli změnám objemu mnohdy hydrostatická čerpadla nazývána jako objemová čerpadla. [5], [6], [7]

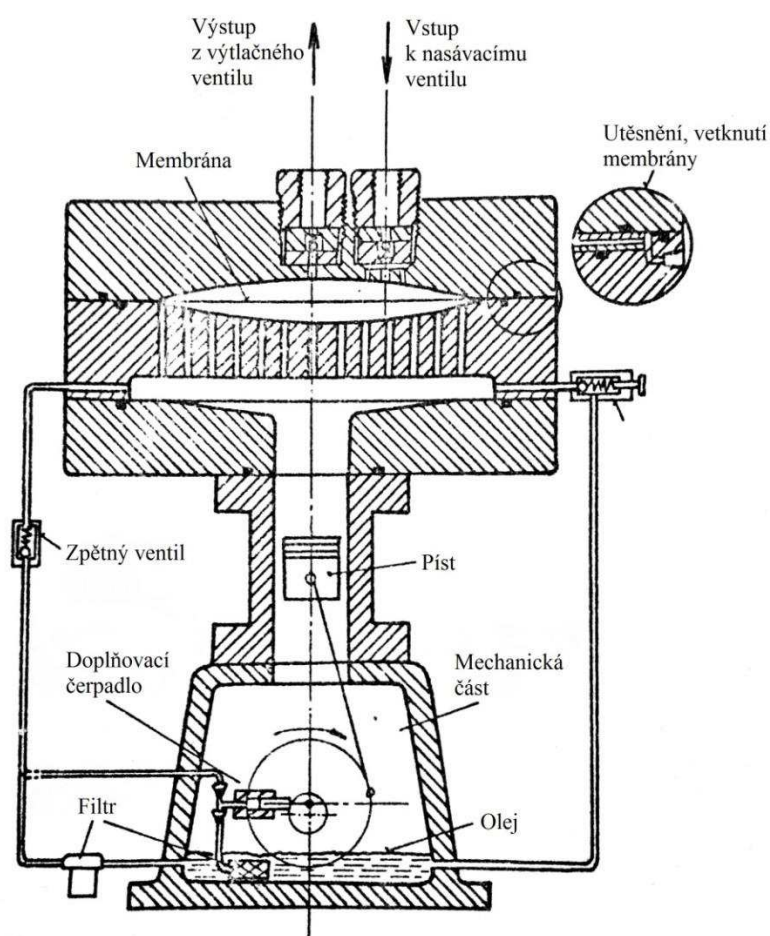
1.2.1 MEMBRÁNOVÁ ČERPADLA

[4], [6]

Spolu s plunžrovými a pístovými čerpadly se membránová čerpadla zařazují do hydrostatických čerpadel s kmitavým pohybem pracovního prvku. Základním znakem tohoto čerpadla je membrána, která se nachází na rozhraní prostoru čerpané kapaliny a dalších dutin čerpadla. Membrána má většinou kruhový nebo válcový tvar. Princip čerpadla souvisí s možným průhybem membrány, který je uskutečňován mechanicky, hydraulicky či pneumaticky, přičemž mechanický pohon je zajišťován pomocí klikové hřídele.

Důležitým faktorem životnosti hydraulického stroje je materiál membrány. Jeho vhodné použití je určováno v závislosti na velikosti provozních tlaků a také na teplotách a chemických vlastnostech čerpaného média. Při tlacích vyšších jak 40 MPa se využívají chromniklové ocelové membrány, při tlacích pod 40 MPa se vyrábí z teflonu nebo pryže. Pro válcové membrány platí, že výhodné konstrukční materiály jsou plasty. Součástí čerpadel je pojistný ventil s výjimkou pneumaticky poháněného membránového čerpadla.

Jsou vhodná pro transport tekutin s vysokou viskozitou, drahých, nebezpečných a také jedovatých látek.



Obrázek 9: Membránové čerpadlo [6](upraveno)

1.2.2 PERISTALTICKÁ ČERPADLA

[25], [26]

Řadíme je do skupiny hydrostatických rotačních čerpadel nebo také objemových čerpadel. Jejich princip je založen na elastické hadici, která je schopna se deformovat a vracet se zpět do původní polohy. Je uložena do kruhové dutiny podél stěny. Elastická hadice je stlačována kladkami neboli rolery, jenž se otáčejí ve válcové dutině a jsou uloženy pevně ve středu čerpadla. Transportovaná kapalina proudí hadicí pulzně, vlivem odvalování kladek po povrchu hadice během rotace. Díky její zpětné deformaci do původního nestlačeného tvaru nastává samonasávání čerpadla. Jako vhodný materiál skrze nutnost elastického stlačení hadic je volen silikon, latex či PVC.

Významnými výhodami je právě samonasávací schopnost, bezpečnost, spolehlivost i objemová přesnost. Do konstrukce není potřeba zahrnovat ventil ani těsnění. Nevýhody naopak spočívají v krátkodobém zpětném proudění a v možném neúplném návratu hadice do původní polohy při vyšších otáčkách.



Obrázek 10: Peristaltické čerpadlo [26]

2 TOTÁLNÍ SRDEČNÍ NÁHRADY

[8]

Kapitola bude pojednávat o modernějších totálních srdečních náhradách a podporách i o jejich dalším vývoji. Zmíněna budou také výzkumná centra, která se umělým srdcím věnují.

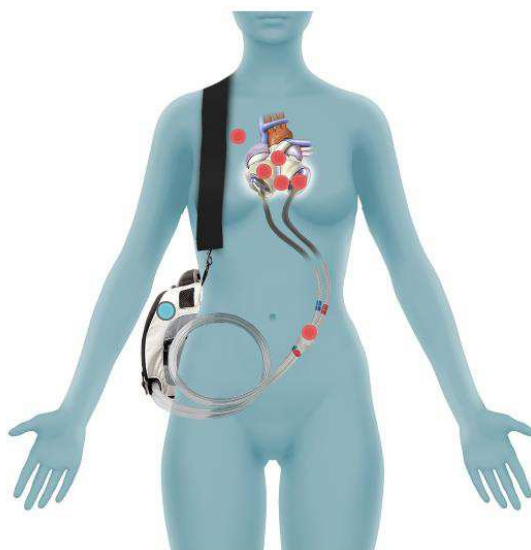
2.1 SYNCARDIA TAH

[9]

V devadesátých letech minulého století převzalo Lékařské centrum Univerzity v Arizone výzkum jedné z prvních srdečních náhrad Jarwiku-7 a dále pracovalo na vývoji novějšího typu tohoto umělého srdce, čímž vznikl typ SynCardia TAH, dříve známý jako CardioWest TAH. Jedná se o pulzní srdeční náhradu.

Zařízení se skládá ze dvou polyuretanových komor s objemem 70 ml, membrány, čtyř mechanických diskových ventilů, dvou kanyl a vnějšího pneumatického zařízení. Díky danému objemu komor může mechanické srdce přečerpat až $9,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Membrána je také vyrobena z polyuretanu a odděluje krevní komoru od přívodu vzduchu. Jednotlivé ventily kontrolují prostřednictvím naklonění disku směr proudu krve. Kanyly jsou dlouhé kolem 2 m a spojují umělé srdce s pneumatickým zařízením. To vytváří tlakové pulzace vzduchu, který proudí skrz kanyly až k membráně. Zde se energie pulzace přenesou do krevní komory, díky níž začne krev proudit daným směrem. Pneumatické zařízení je poháněno bateriemi nebo alternativními zdroji. SynCardia TAH byl upraven pro ženy a děti tak, že se objem polyuretanových komor zmenšil na 50 ml, tudíž se zmenšil i objem přečerpané krve, konkrétně na $7,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$.

Umělá náhrada SynCardia TAH byla implantována už více než jednomu tisíci pacientů. Hlavní výhodou umělého srdce je biokompatibilní materiál, ze kterého je srdce vyrobeno, a přenosnost zařízení. Naopak nevýhody srdce spočívají v možném mechanickém selhání komor, ventilů či pohyblivých částí při delším používání a problémy se srážlivostí krve.



Obrázek 11: SynCardia TAH [9]



Obrázek 12: SynCardia [8]

2.2 ABIOCoRTAH

Jedná se, stejně jako v předchozím případě, o pulzující typ umělého srdce firmy Abiomed. Je vyroben z biokompatibilního titanu a polyuretanových materiálů, váží kolem 1 kg.

Princip tohoto umělého srdce je založen na malém odstředivém čerpadle, které používá jako médium hydraulickou stlačitelnou kapalinu s nízkou viskozitou. Médium přenáší energii tak, že deformuje polyuretanovou komoru a ta způsobí, že krev proudí do dalších komor. Součástí mechanismu je ventil, který se dokáže přepínat mezi dvěma pozicemi, a s pomocí hydraulické kapaliny vytváří tlak v levé i v pravé komoře. Celý hydraulický systém dokáže generovat kolem 150 těchto pozic za minutu, což přibližně odpovídá lidské tepové frekvenci 75 – 150 tepů za minutu. AbioCor přečerpá kolem $4 - 8 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$, což obdobně odpovídá lidské potřebě. Srdce je poháněno transkutánním přenosem energie tzn. přenos přes kůži. Model obsahuje dvě baterie – vnitřní a vnější, přičemž vnitřní baterie funguje jako záložní zdroj po dobu dvaceti minut.

AbioCor byl podle dostupných informací implantován od roku 2001 do roku 2004 čtrnácti pacientům, přičemž mechanická náhrada byla nejvíce funkční sedmnáct měsíců. Kvůli selhání umělého srdce vlivem vzniku krevních sraženin byl výzkum v roce 2006 pozastaven. Výhodou byly opět biokompatibilní materiály jednotlivých částí, které byly zabudovány v těle, a také ve vnější konstrukci, jež se skládala z několika lehkých součástí oproti modelu SynCardia TAH, tudíž se jednalo o snadno přenosné zařízení. Při dlouhém užívání nastávaly, jak už bylo zmíněno, problémy s krevní srážlivostí a mechanické problémy.



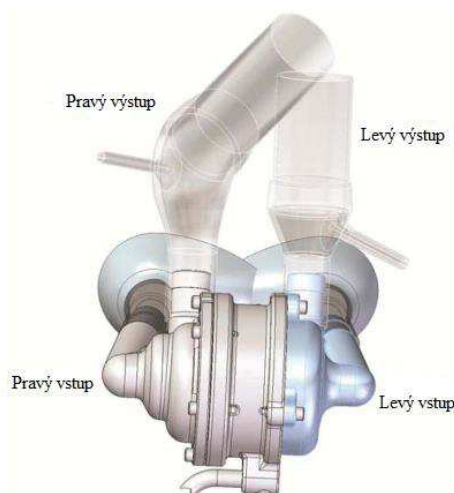
Obrázek 13: AbioCor [8]

2.3 CFTAH

Tento typ umělého srdce vynalezla Clevelandská klinika a jedná se o bezpulzní umělou náhradu, čímž se odlišuje od ostatních náhrad, jelikož funkce je zajištěna bez mechanických ventilů, membrán, sensorů nebo regulátorů.

Je tvořena jedním hydrodynamickým ložiskem. Rozměry srdce se pohybují kolem 6 cm v průměru a 10 cm na výšku a bylo vyrobeno z biokompatibilního titanu a plastových materiálů. CFTAH není rozdělen na levou a pravou komoru jako lidské srdce. Obsahuje jednu komoru, v níž je oběžné kolo odstředivého čerpadla, které zajišťuje plicní i tělní oběh krve. Pohon je zajištěn jediným motorem a napájecím kabelem.

CFTAH bylo vyzkoušeno jen na zvířecích jedincích, člověku zatím voperováno nebylo. Výhodné je použití biokompatibilních materiálů a odlišná konstrukce bez dalších mechanických částí, které mohou způsobit selhání. Problémy mohou být s bateriemi, které jsou stále ve fázi testování.



Obrázek 14: CFTAH [10]

2.4 CARMATAH

Srdeční náhrada byla vyvíjena v stejnojmenném výzkumném ústavu Carmat ve Francii.

Zajímavostí tohoto typu srdce je, že se skládá jak z mechanických částí, tak také z biologických tkání, konkrétně hovězích. Carmat TAH je tvořen dvěma dutinami, které jsou oddělené flexibilní biomembránou. Jedna dutina je určena pro krev, druhá pro médium, jež je poháněno pomocí čerpadla. Čerpadlo uvádí do pohybu médium, deformující biomembránu a předávající energii krvi v druhé komoře, která je tímto uvedena do oběhu. Chlopně nebo ventily jsou taktéž vyrobeny z biologické tkáně a obsahují mikroprocesor se senzory, měřící tlak, průtok a informace o fyzických aktivitách jedince. Jedná se tedy o pulzující typ umělého srdce, které je schopno přečerpávat $2 - 9 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. [11]

Carmat TAH byl zatím implementován jen jednomu člověku, který žil s touto náhradou 75 dní. Výhodou bylo shledáno použití biologických materiálů a sensorů tvořící kontrolní systém umělého srdce. Zatímco za nevýhodu je považována možná nadměrná srážlivost krve a krátká mechanická i materiálová trvanlivost.



Obrázek 15: Carmat TAH [8]

2.5 BiVACOR TAH

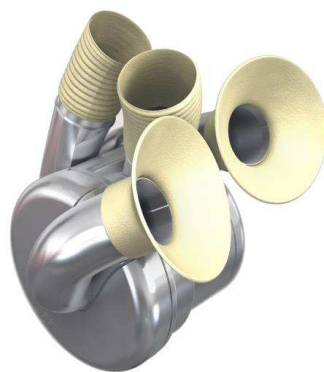
[12]

Jedná se o novější typ bezpulzního umělého srdce, které bylo vyvinuto v americké společnosti BiVACOR v Houstonu, určené k implantaci až na dobu kolem 10 let.

Rozměrově je srdce malé kompaktní zařízení, určené tedy i pro ženy a děti. Průměr srdce činí asi 60 mm, výška se pohybuje taktéž kolem 60 mm. Princip umělé náhrady spočívá v magneticky levitujícím rotoru umístěném v dutině čerpadla. Rotor představuje dvě oběžná kola odstředivého čerpadla, jež nahrazují funkci levé i pravé části lidského srdce. Dalšími částmi zařízení jsou magnetická ložiska a elektromagnetický motor, kterému je energie dodávána vnějšími bateriemi. Umělá náhrada je schopna přečerpávat kolem

$12 - 20 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Aby nedocházelo k degradaci krve, byla konstrukce čerpadla opatřena speciální spárou, která by měla zabránovat tvorbě krevních sraženin. BiVACOR je také opatřen technologiemi, snímající fyzickou aktivitu člověka.

Podle dostupných informací zatím nebylo srdce voperováno člověku, pouze živočišným jedincům, ale prozatímní studie zaručují tomuto umělému srdci slibnou budoucnost. Výhodou je dobře designovaný návrh čerpadla, jež dokáže čerpat krev rychleji a s nízkou energetickou spotřebou, malé rozměry vnitřních i vnějších částí, malé procento vzniku krevní sraženiny, trvanlivost umělého srdce a velké množství senzorů, monitorujících správnou funkčnost. Vážné nevýhody zatím nejsou známy, mohou se objevit až s implantací člověku.



Obrázek 16: BiVACOR [12]

2.6 HFTAH

[13], [14]

HFTAH v překladu označuje totální umělé srdce se šroubovitým směrem proudu. Tento typ umělé náhrady začali vyvíjet japoňští univerzitní vědci v Tokiu v roce 2005, přičemž se nechali inspirovat konstrukcí srdce BiVACOR TAH.

Náhrada je dimenzována na 40 – 80 kg tělesné hmotnosti. Skládá se ze dvou šroubových čerpadel, mezi nimiž je umístěn stator motoru, tudíž je stator krví ochlazován. Šroubové čerpadlo je tvořeno oběžným kolem s vestavěným magnetem v rotoru. Součástí konstrukce jsou také hydrodynamická ložiska, umístěná mezi oběžným kolem a statorem, díky nimž vzniká levitace kola. Vnitřní plochy zařízení jsou potaženy polymerním nátěrem. Nejvyšší tlak, který zařízení vyvinulo, se pohyboval kolem 100 mm Hg, přičemž maximální průtok byl naměřen $19 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ v levém šroubovém čerpadle a $13 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ v pravé části. Na vstupu čerpadel byly implementovány senzory na měření tlaku.

Prozatím je srdce HFTAH zkoušeno od roku 2011 jen na zvířecích exemplářích, přičemž umělá náhrada nejdéle fungovala po dobu sto dnů. Největší technické problémy byly objeveny ve spojitosti s hydrodynamickým ložiskem v pravém šroubovém čerpadle. U některých zvířat byly nalezeny patologické změny na vnitřních orgánech zejména játrech, ledvinách a plicích, které byly způsobeny použitím nesprávného konstrukčního materiálu. Proto se do budoucna předpokládá použití tohoto umělého srdce, pokud bude vhodně optimalizováno.



Obrázek 17: HFTAH [14]

2.7 BiVAD

Podkapitola pojednává jen o srdečních podporách, nikoliv o totálních srdečních náhradách. Jsou zajímavé tím, že mohou být používány i v kombinaci dvou stejných nebo odlišných podpor, a tak každá z nich pomáhá jedné ze srdečních komor.

2.7.1 CORAIDE A DEXAIDE

Srdeční podpory byly vynalezeny ve výzkumném pracovišti v Clevelandu téměř současně. V obou případech se jedná o typ odstředivých čerpadel s magnetickými

hydrodynamickými ložisky, aby rotor čerpadla levitoval. Obě zařízení jsou vybavena vnějším přenosným elektronickým pohonným systémem. Podpora CorAide byla již implantována lidem a je určena pro levou komoru, zatímco DexAide byla testována jen na zvířatech a slouží jako srdeční podpora pravé komory. Pokud se otáčky CorAide drží konstantně kolem 2600 min^{-1} , pak se otáčky DexAide pohybují od 2000 do 3200 min^{-1} , což přibližně platí i v opačném případě.

2.7.2 JARVIK 2000 FLOW MAKER

Rozměry srdeční podpory jsou velmi malé, blíží se rozměrům napájecí baterie – průměr $2,5 \text{ cm}$ a výška 8 cm . Celková hmotnost se pohybuje kolem 90 g . Konstrukce Jarviku se dále skládá z motoru, rotoru, dvou keramických ložisek a malého oběžného kola, navrženého jako axiální čerpadlo a schopného přečerpávat asi $8,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Je určen jen jako podpora slabšího srdce, přestože by zařízení se svým výkonem mohlo zastávat i funkci totální srdeční náhrady. Výhodné je, že si pacient může manuálně nastavit rychlost otáčení kola čerpadla a průtok. Při použití dvou těchto podpor, jednu pro plicní oběh a druhou pro tělní oběh, je možné nastavení rozdílných průtoků srdečních pump. [15]



Obrázek 18: Jarvik 2000 Flow Maker [15]

2.7.3 DURAHEART

DuraHeart bylo vynalezeno kolem roku 2000 firmou Thoratec. Patří mezi menší srdeční podpory, jeho vnější průměr je asi $7,2 \text{ cm}$ a výška $4,5 \text{ cm}$, hmotnost se pohybuje okolo 540 g . Jedná se o odstředivé čerpadlo, které se skládá z oběžného kola, magnetického ložiska, motoru a krytování. Všechny součásti jsou vyrobeny z titanu nebo oceli. Princip čerpadla je založen na magnetické levitaci. Zařízení je schopno přečerpávat $8 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ krve při tlaku 120 mm Hg . Při minimálním tlaku 50 mm Hg se otáčky pohybují okolo 1200 min^{-1} , zatímco při maximálním tlaku 180 mm Hg okolo 2400 min^{-1} . Riziko vzniku trombózy snižuje stabilní pozice oběžného kola. Jeho povrchy byly kvůli kontaktu s krví modifikovány kovalentně vázaným heparinem. Srdeční podpora je také opatřena kontrolním systémem, který monitoruje správné fungování srdeční podpory. [18]

2.7.4 HEARTMATE II

Tato podpora byla vynalezena u firmy Thoratec a vycházela z modelu Jarvik 2000. HeartMate II bylo v roce 2010 schváleno jako dlouhotrvající zařízení pro srdeční podporu. Je vhodné i pro implantaci dětem a ženám. I v tomto případě se jedná o axiální čerpadlo, které je schopno čerpat až $10 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Zařízení je vyrobeno z titanu. Ze všech srdečních podpor má nejnižší riziko vzniku srážení krve. Je poháněno během dne bateriemi, které vydrží napájet čerpadlo asi $12 - 18$ hodin. Během noci využívá pacient

napájecí jednotku. Dlouhodobě je také využíváno v České republice, konkrétně v kardiologické klinice IKEM. Po celém světě bylo transplantováno více než deseti tisícům pacientů, tudíž je jednou z nejvyžívanějších srdečních podpor na světě. [1], [16], [17]



Obrázek 19: HeartMate II [16]

2.7.5 HEARTWARE (HVAD)

Jedná se o další hydrodynamické odstředivé čerpadlo, jehož objem se odhaduje okolo 45 ml. Celková hmotnost je 45 g. Srdeční podpora přečerpá $2 - 10 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$, dokáže pracovat při tlacích od 0 do 170 mm Hg, přičemž oběžné kolo může rotovat od 2000 do 4000 min^{-1} . Do dubna roku 2017 bylo toto zařízení použito k implantaci ve více než 47 zemích a přijalo ho více než 13 000 pacientů, proto taktéž patří mezi nejrozšířenější srdeční podpory na světě. [19]



Obrázek 20: HeartWare [19]

2.7.6 EXCOR

Jde o produkt německé firmy Berlin Heart, který existuje ve dvou variantách – jedna určená pro děti a druhá pro dospělé. Skládá se z membránového čerpadla, kanyly, třívrstvé membrány a elektropneumatické pohonné jednotky. K dispozici jsou čerpadla ve více modifikacích, konkrétně s objemem 10, 15, 25, 30, 50, 60 nebo 80 ml. Součástí konstrukce jsou mimo jiné také polyuretanové ventily. Existují ve více variantách a jejich účelem je zajišťování požadovaného směru proudu krve. Hlavní výhodou je použití biokompatibilních materiálů, kvalitní kontrolní systém správné funkčnosti či povrchově

upravené části srdeční podpory heparinem, který snižuje vznik trombózy či hemolýzy. Naopak nevýhodou je masivní pohonná jednotka, možné selhání ventilů nebo rotujících částí a problémy spojené s trvanlivostí při dlouhém používání. [20]



Obrázek 21: Membránové čerpadlo EXCOR [20]

2.7.7 INCOR

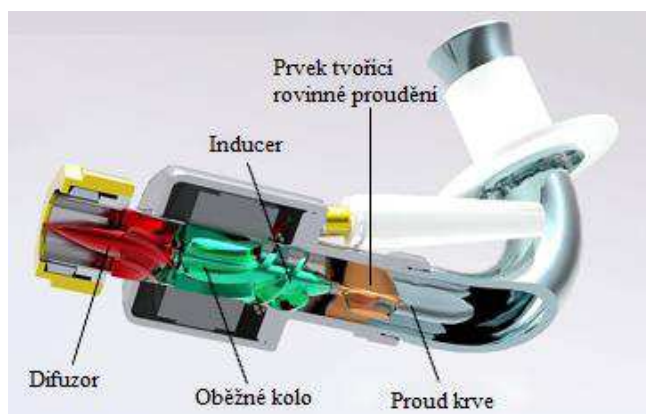
Jedná se o světově rozšířenou podporu levé části srdce, kterou vyrábí německá firma Berlin Heart. Patří do třídy hydrodynamických čerpadel, konkrétně se jedná o axiální čerpadlo. Je vyrobeno z biokompatibilního titanu, povrchově upraveného heparinem. Dokáže přečerpávat $2 - 9 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ při tlaku 80 mm Hg. Rozměrově se jedná o velmi malé srdeční podpůrné zařízení. Proudění ovlivňují magnetická ložiska, jež jsou v konstrukci použita. Otáčky rotoru čerpadla se pohybují od 5000 do 10000 min^{-1} . Zařízení je poháněno vnějšími bateriemi, které dodávají energii srdeční podpoře až sedm hodin. INCOR je také opatřen softwarem, kontrolující správné fungování. Je určen pro implantaci na delší dobu. [20]



Obrázek 22: Axiální čerpadlo INCOR [20]

2.7.8 HEART ASSIST 5

Je to zařízení na produkt od firmy Reliant Heart, díky svým rozměrům a hmotnosti se stává nejmenší srdeční podporou na světě – váží jen 92 g. Přitom dokáže čerpat $2 - 10 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Malá konstrukce je výhodná z důvodu, že může být voperována i dětem. Jde o axiální čerpadlo. [21]



Obrázek 23: Heart Assist 5 [21] (upraveno)

2.7.9 THORATEC CENTRIMAG, THORATEC PEDIVAS

Další srdeční podpora firmy Thoratec je určena pro krátkodobé použití – asi po dobu 30 dnů. Může sloužit jako podpora pro levou část, ale také i pro pravou část srdce, přičemž dokáže přečerpávat až $10 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Jde o odstředivé čerpadlo, fungující na principu levitujícího rotoru v magnetickém poli. Není tudíž zapotřebí jiných spojovacích mechanických dílů (např. ložiska aj.), čímž se snižuje riziko vzniku krevních sraženin v důsledku nižších smykových napětí. Čerpadlo je poháněno interními bateriemi. [22]

Thoratec PediVAS je obdobná srdeční podpora jako Thoratec CentriMag s rozdílem, že toto zařízení je určeno pro malé děti. Veškeré parametry a principy jsou stejné s výjimkou maximálního průtoku – do $1,7 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. [23]



Obrázek 24: Thoratec CentriMag (Thoratec PediVAS) [22]

2.7.10 HEARTMATE III

Nejnovější zařízení na podporu srdce opět od firmy Thorarec, které bylo vyvinuto na základě principů a poznatků z předchozího zařízení Thoratec CentriMag. Je určeno pro široký okruh lidí. Jedná se o čerpadlo, které může podporovat dlouhodobě levou komoru. Dokáže transportovat až $10 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ a to u všech pacientů. Na výrobu pumpy se používá titan a princip fungování je také stejný jako u CentriMagu – magnetická levitace rotoru. Vnitřní povrchy jsou texturizovány, aby nevznikala hemolýza krve. Jestliže tedy nenastává tvorba krevních sraženin, pak podle klinických studií účinnost přesahuje 90 %, s delším používáním však účinnost klesá. Čerpadlo je napájeno

bateriemi, které dodávají energii 12 – 18 hodin, přes noc je vhodné využívat napájecí jednotku. Srdeční podpora je vybavena softwarem, sledující srdeční činnost pacienta. [24]



Obrázek 25: HeartMate III [24]

2.8 VÝZKUM NAŠEHO ODBORU

Tématem srdečních náhrad a podpor se zabývá více jak deset let také Odbor fluidního inženýrství Viktora Kaplana na Vysokém učení technickém v Brně. Vířivá, membránová, pístová, axiální, sinusová či palivová čerpadla byla zkoumána v několika závěrečných pracích absolventů, zejména jejich případné využití jako totální srdeční náhrady nebo podpory. Dále byly zkoumány jevy, které souvisí s umělým srdcem. Veškeré práce ohledně tohoto tématu jsou sepsány níže:

FIALOVÁ, Simona. *Čerpadlo pro mimotělní krevní oběh = The extracorporeal blood pump: zkrácená verze Ph.D. Thesis*. Brno: VUT FSI, 2004, 68 s.

HUDÁK, Igor. *Vlastnosti gelů používaných ve fluidním inženýrství*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2010.

MACHÁT, Pavel. *Studie pístového čerpadla s lineárním motorem*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2010.

DUBOVÝ, Luboš. *Studie membránového čerpadla s lineárním motorem*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2010.

JÁCHYM, Jan. *Studie pístového čerpadla s lineárním motorem*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2011.

ČEJKA, Pavel. *Studie membránového čerpadla s lineárním motorem*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2011.

HAVLÁT, Pavel. *Konstrukční studie sinusového čerpadla*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2011.

DANČÁK, Zdeněk. *Teoreticko-experimentální stanovení měrné energie vířivého čerpadla*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2011.

SEDLÁČEK, Jiří. *Přímočarý hydromotor*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012.

ŠVESTKA, Jiří. *Studie pístového čerpadla s inverzním kuličkovým šroubem a zatopeným motorem*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012.

ŠMÍD, Pavel. *Optimalizace vířivého čerpadla*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012.

SLUŠE, Jan. *Optimalizace sinusového čerpadla*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012.

KALINA, Adam. *Palivová čerpadla v raketách*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013.

ŠEDIVÝ, Dominik. *Čerpadla určená pro náhradu lidského srdce*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014

STAREČEK, Jakub. *Návrh axiálního čerpadla pro zadané parametry*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015.

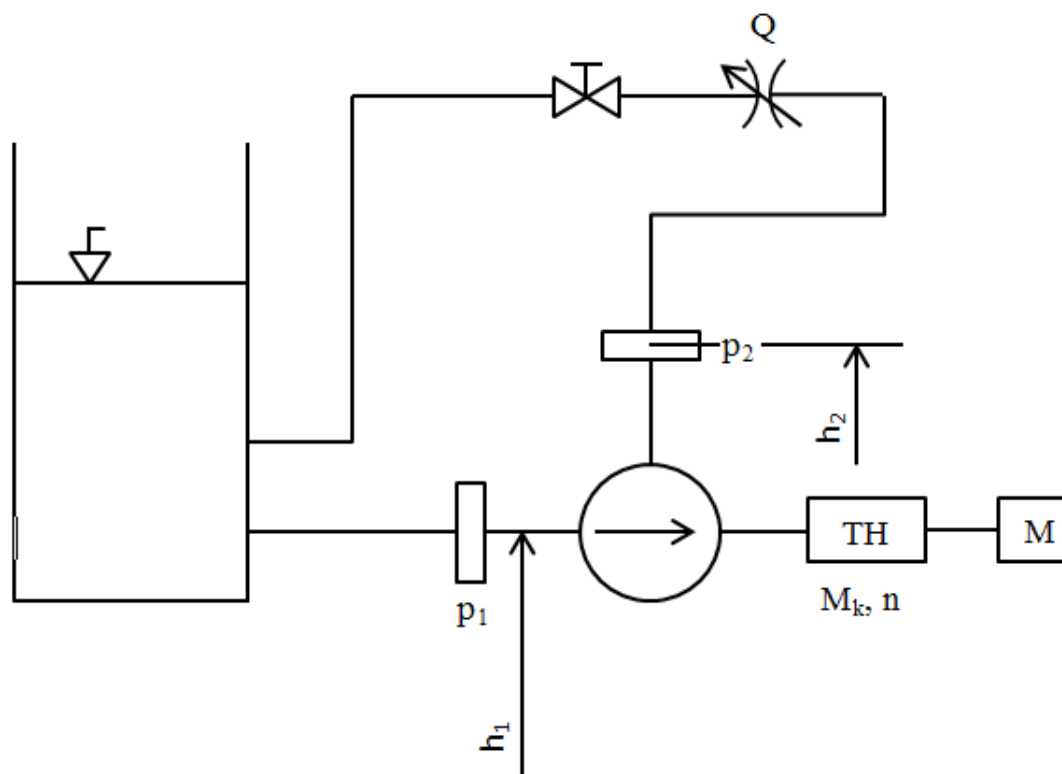
ČÁPOVÁ, Ludmila. *Umělé srdce*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016.

COUFALÍK, Martin. *Vířivé čerpadlo jako možná srdeční náhrada*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017.

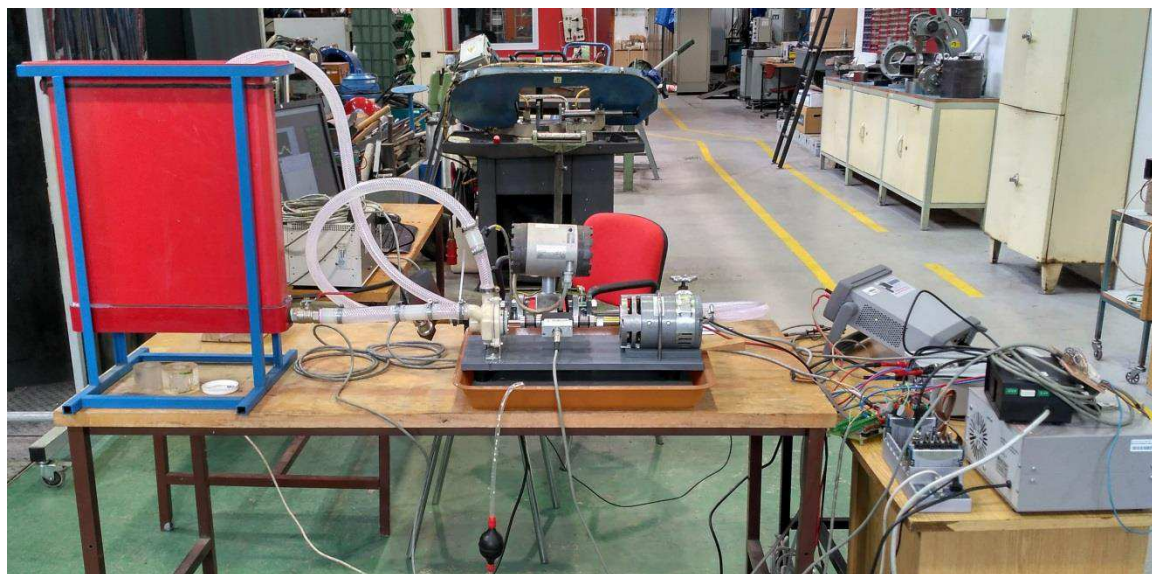
3 POČÁTEČNÍ EXPERIMENT

Na počáteční experiment byl použit model vířivého čerpadla z roku 2012, který byl konstruován Ing. Pavlem Šmídem. [28]

3.1 MĚŘÍCÍ TRAT'



Obrázek 26: Schéma počátečního experimentu



Obrázek 27: Sestavení experimentu v Hydraulické laboratoři

Měřicí trať se skládá ze sací nádrže, regulačního ventilu, průtokoměru, dvou snímačů tlaků, které byly umístěny v oblasti sání a výtlačku čerpadla, tenzometrické hřídele, elektromotoru a samotného čerpadla. Průměr potrubí odpovídal konstrukčnímu řešení vířivého čerpadla – sací potrubí o vnitřním průměru 18 mm, výtlačné potrubí o vnitřním průměru 16 mm.

3.2 MĚŘENÉ VELIČINY

p_1 – tlak v místě sání	kPa
p_2 – tlak v místě výtlačku	kPa
U – výstupní signál momentu síly	V
I – proudový výstup	A
n – otáčky čerpadla	min^{-1}
Q – průtok na měřené trati	$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$

3.3 MĚŘÍCÍ TECHNIKA

p_1 – snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENZORS s.r.o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0 – 1,6 bar (A), přesnost $\pm 0,25$ % z rozsahu, proudový výstup 0–20 mA, v.č. 111160122

p_2 – snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENZORS s.r.o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0 – 1,6 bar (A), přesnost $\pm 0,25$ % z rozsahu, proudový výstup 0–20 mA, v.č. 111160122

M_k (U , I), n – tenzometrická hřídel T20WN, výrobce HBM, měřicí rozsah krouticího momentu 0 – 2 N·m, měřicí rozsah otáček 0 – 3000 min^{-1} , přesnost $\pm 0,002$ z rozsahu, výstupní signál momentu síly ± 10 V, frekvenční rozsah 0 – 1 kHz, v.č. 60306160

Kvůli disfunkci tenzometrické hřídele byly naměřeny hodnoty elektrického napětí a proudu, z nichž byly dále určeny hodnoty krouticího momentu na základě výpočtu příkonu.

Q – snímač průtoku MQI 99 - CN, výrobce Ela spol. s.r.o. Brno, DN 20, měřicí rozsah 0 – 5 $\text{m}^3\cdot\text{hod}^{-1}$, přesnost $\pm 0,3$ % z měřené veličiny, proudový výstup 4 – 20 mA, v.č. 10597

3.4 VYPOČÍTANÉ VELIČINY

Z naměřených hodnot byly vypočteny tyto veličiny:

Y – měrná energie čerpadla	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
Pr – příkon čerpadla	W
M_k – krouticí moment hřídele	N·m

3.5 VÝPOČETNÍ VZTAHY

[27]

Pro stanovení měrné energie využijeme tuto upravenou Bernoulliho rovnici

$$Y = \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g \cdot z \quad (1)$$

kde byl zanedbán výškový rozdíl snímačů z a rychlosti proudění c_1, c_2 byly nahrazeny podle Rovnice kontinuity podílem průtoku Q a obsahem průřezů jednotlivých potrubí S_1, S_2 . Tudíž byl vztah upraven.

$$Y = \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot \left(\left(\frac{Q}{S_2} \right)^2 - \left(\frac{Q}{S_1} \right)^2 \right) \quad (2)$$

Příkon Pr byl při disfunkci tenzometrické hřídele stanoven z následujícího vzorce.

$$Pr = U \cdot I \quad (3)$$

Z něhož byl poté dopočítán krouticí moment M_k .

$$M_k = \frac{Pr}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (4)$$

Dalším krokem vyhodnocení experimentu je stanovení nejistot měření, přičemž je počítáno jen se systematickou chybou nejistoty měření, neboli nejistotou typu B, která je způsobená nepřesností měřící techniky. Byl využit vztah pro stanovení nejistoty měření měrné energie a nejistoty měření příkonu.

$$u_{BY} = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial p_v} \cdot u_{Bp_v} \right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial p_s} \cdot u_{Bp_s} \right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial Q} \cdot u_{BQ} \right)^2} \quad (5)$$

$$u_{BY} = \sqrt{\left(\frac{u_{Bp_v}}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{u_{Bp_s}}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{1}{S_v^2} \cdot Q \cdot u_{BQ} \right)^2} \quad (6)$$

$$u_{BPr} = \sqrt{\left(\frac{\partial Pr}{\partial M_k} \cdot u_{BM_k} \right)^2 + \left(\frac{\partial Pr}{\partial n} \cdot u_{Bn} \right)^2} \quad (7)$$

$$u_{BPr} = \sqrt{\left(2 \cdot \pi \cdot n \cdot u_{BM_k} \right)^2 + \left(2 \cdot \pi \cdot M_k \cdot u_{Bn} \right)^2} \quad (8)$$

3.6 VYHODNOCENÍ

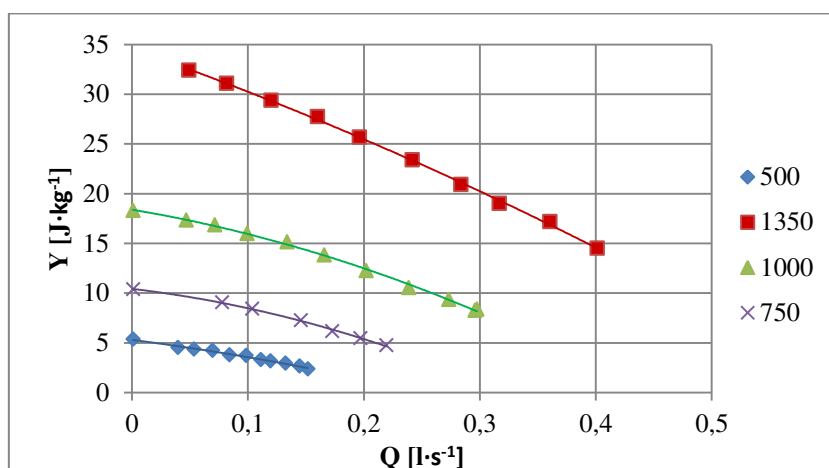
K vyhodnocení byl použit program Excel Microsoft. Vířivé čerpadlo bylo změřeno pro otáčky 500, 750, 1000 a 1350 min^{-1} a to v obou směrech natočení lopatek (viz obrázek 28 a obrázek 29).

3.6.1 PRVNÍ VARIANTA

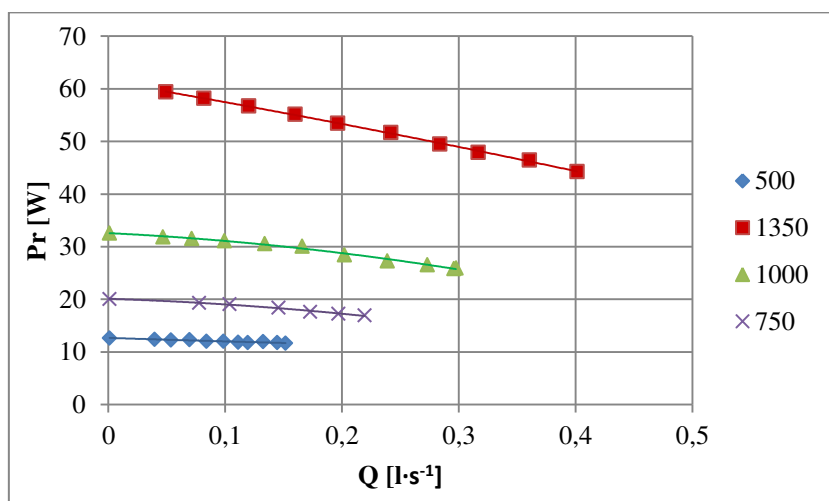
Směr otáčení lopatek podle následujícího obrázku:



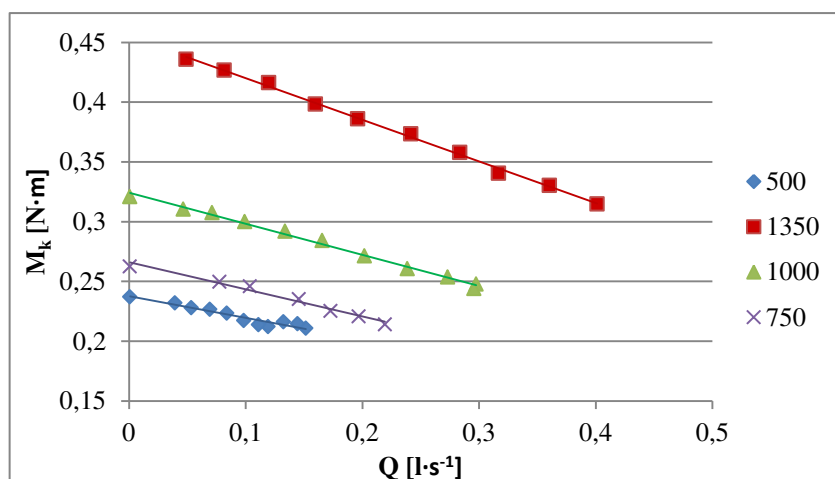
Obrázek 28: První varianta směru otáčení lopatek ve vířivém čerpadle



Graf 1: Závislost měrné energie na průtoku při měřených otáčkách



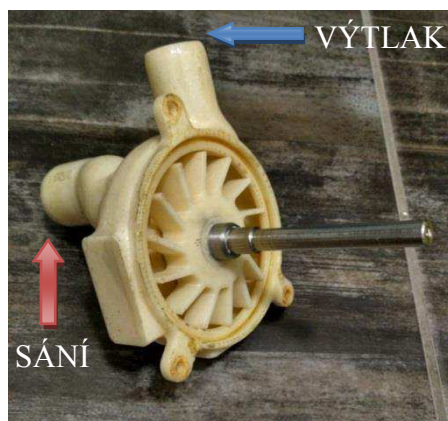
Graf 2: Závislost příkonu na průtoku při měřených otáčkách



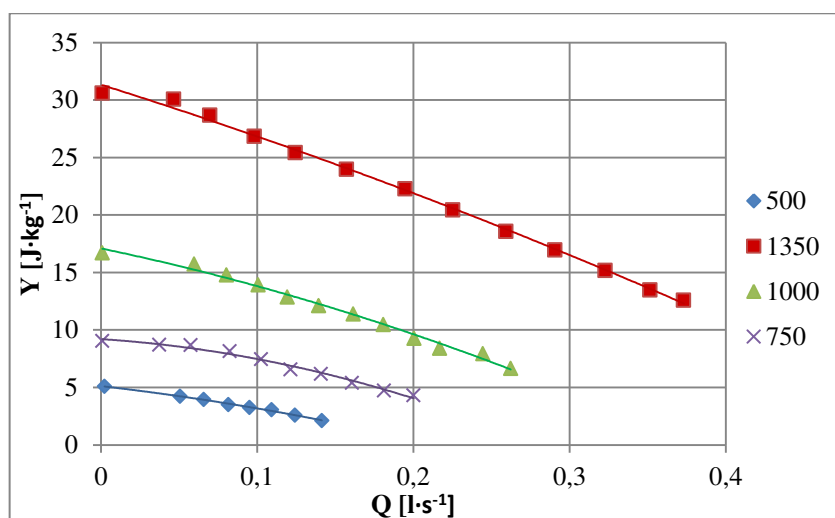
Graf 3: Závislost krouticího momentu na průtoku při měřených otáčkách

3.6.2 DRUHÁ VARIANTA

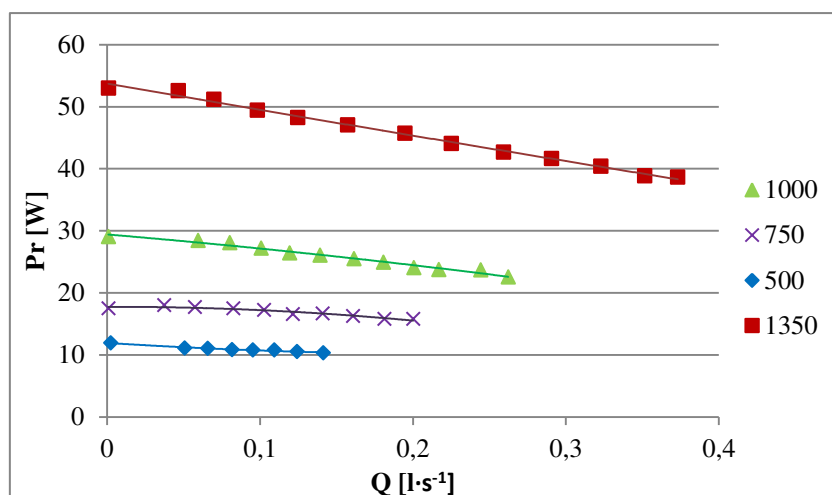
Opačný směr otáčení lopatek podle obrázek 29:



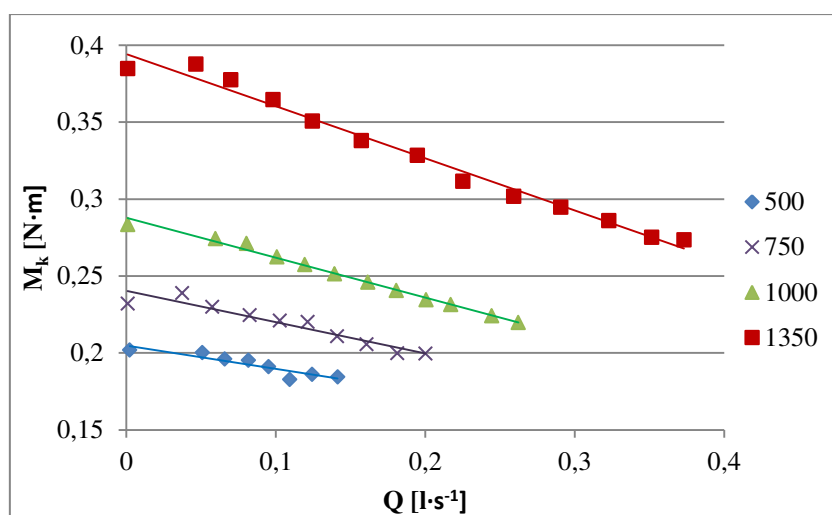
Obrázek 29: Druhá varianta směru otáčení lopatek ve vířivém čerpadle



Graf 4: Závislost měrné energie na průtoku při daných měřených otáčkách



Graf 5: Závislost příkonu na průtoku při měřených otáčkách



Graf 6: Závislost krouticího momentu na průtoku při měřených otáčkách

Grafy měrných energií a příkonu byly proloženy polynomickými křivkami druhého řádu, zatímco grafy krouticích momentů lineární přímkou.

Z vyhodnocených charakteristik vířivého čerpadla lze rozpoznat, že měření první varianty vychází s vyššími měrnými energiemi oproti druhé variantě při stejných otáčkách. Proto budou obě čerpadla dále navrhována s totožným natočením lopatek vůči směru proudění kapaliny a to tak jako v první variantě.

Výpočet nejistot měření spolu s naměřenými a vypočítanými hodnotami požadovaných veličin je přiložen v příloze.

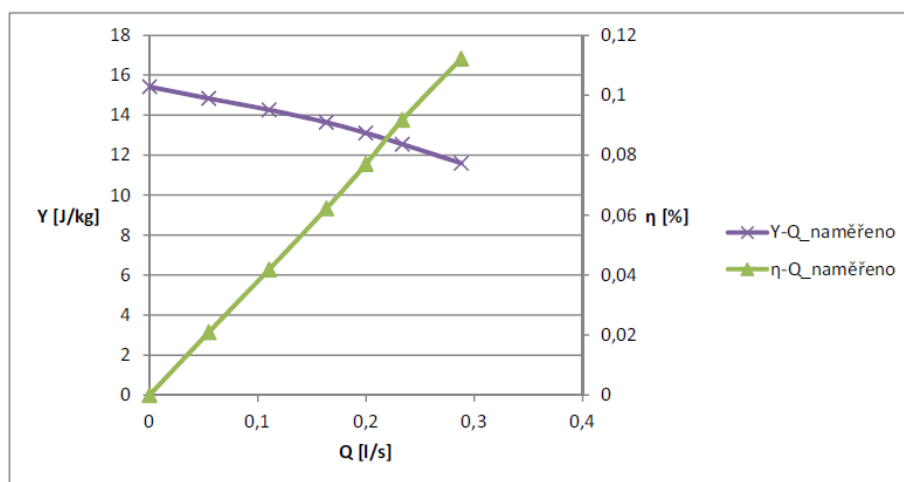
4 HYDRAULICKÝ NÁVRH OBĚŽNÉHO KOLA VÍŘIVÉHO ČERPADLA

4.1 Úvod

Při hydraulickém návrhu vycházíme z cílů diplomové práce, tudíž budou navržena dvě oběžná kola vířivého čerpadla. Jedno zastává funkci levé srdeční předsíně a komory, druhé pracuje jako pravá předsíně a komora.

Návrhový bod čerpadla levé části srdce je definovaný dopravní výškou a průtokem, přičemž dopravní výška je volena 1,5 m a průtok $0,15 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Parametry jsou samozřejmě určeny podle fyziologie lidského srdce. Čerpadlo pravé části nemá známou dopravní výšku, ale průtokový návrhový bod je totožný jako u levého čerpadla.

Návrh otáček obou čerpadel byl zvolen v intervalu od 750 do 1000 min^{-1} , přičemž bylo navázáno na diplomovou práci Optimalizace vířivého čerpadla zpracovanou Ing. Pavlem Šmídem, který volil 600 min^{-1} . Požadovanou dopravní výšku 1,5 m a průtok $0,15 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ při těchto otáčkách nedosáhl, avšak návrhovými body se přiblížil při otáčkách 1300 min^{-1} (graf 7). [28]



Graf 7: Naměřené Y-Q a η-Q charakteristiky při otáčkách 1300 min^{-1} Ing. Pavlem Šmídem

4.2 OBĚŽNÉ KOLO LEVÉHO ČERPADLA

Stejný model vířivého čerpadla Ing. Pavla Šmída byl naměřen i v našem experimentu a návrhový bod byl splněn už přibližně při 1000 min^{-1} , jak bylo znázorněno v grafu v předchozí kapitole (graf 1). Dále byl zhotoven ještě další graf (graf 8), v kterém byla přepočítána měrná energie a průtok podle afinních vztahů (viz níže) právě pro hodnotu jmenovitých otáček 1000 min^{-1} .

$$\frac{Q_{1000}}{Q} = \frac{n_{1000}}{n} \quad [29] \quad (9)$$

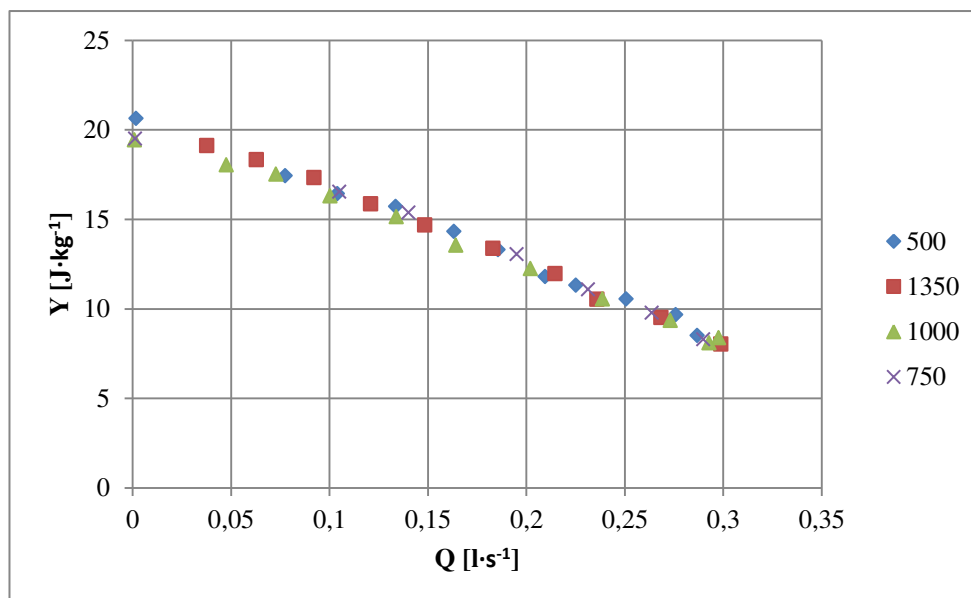
$$\frac{Y_{1000}}{Y} = \left(\frac{n_{1000}}{n} \right)^2 \quad [29] \quad (10)$$

Tyto vztahy platí za následující podmínky.

$$0,5 \leq \frac{n_{1000}}{n} \leq 2,0 \quad [29] \quad (11)$$

Podmínka byla splněna.

$$0,5 \leq \frac{1000}{800} \leq 2,0$$

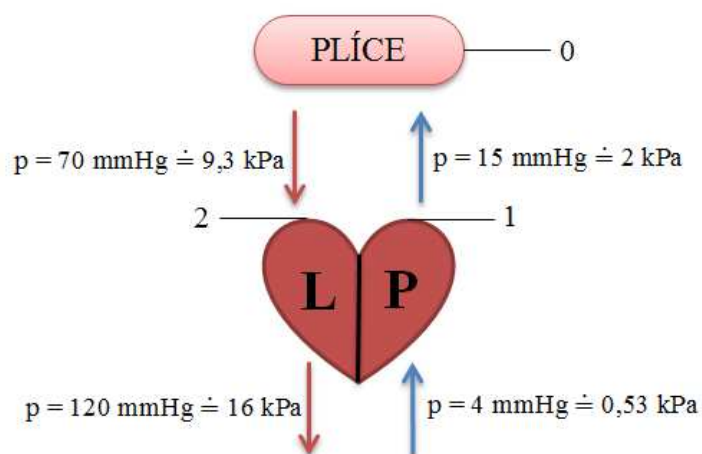


Graf 8: Závislosti měrné energie na průtoku při $n_{jme} = 1000 \text{ min}^{-1}$

Z grafu lze usoudit, že i přepočítané hodnoty měrných energií a průtoků vyhovují návrhovému bodu. Tudíž měřené oběžné kolo bylo z hlediska hydraulického návrhu shledáno jakožto vyhovující levé čerpadlo umělého srdce.

4.3 OBĚŽNÉ KOLA PRAVÉHO ČERPADLA

Jak už bylo zmíněno dříve, pro návrh druhého kola, jež bude nahrazovat funkci pravého srdce, neznáme dopravní výšku H . Lze ji určit z Bernoulliho rovnice, ale musíme znát průměry cév a tlaky na výstupu z pravého srdce a na vstupu do levého. Volený průtok má stejnou hodnotu jako v případě návrhu levého oběžného kola – $0,15 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, jinak by vířivé čerpadlo nefungovalo fyziologicky totožně jako lidské srdce, jehož levá i pravá část přečerpává stejné množství krve.



Obrázek 30: Vstupní a výstupní tlaky srdce ([1], [30], [31])

Pro výpočet dopravní výšky byla použita obecná Bernoulliho rovnice, vyjádřená beze ztrát.

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{v_0^2}{2} = \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot h \quad [33] \quad (12)$$

Vzorec byl upraven konkrétně pro náš případ, ve kterém uvažujeme proudění tekutiny v místech 1-0 a 0-2, přičemž rychlost je nahrazena podílem průtoku a obsahu průřezu cév z rovnice kontinuity.

$$1-0: \quad \frac{p_1}{\rho} + \frac{Q_1^2}{2 \cdot S_1^2} + g \cdot H = \frac{p_0}{\rho} + \frac{Q_0^2}{2 \cdot S_0^2} \quad (13)$$

$$0-2: \quad \frac{p_0}{\rho} + \frac{Q_0^2}{2 \cdot S_0^2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{Q_2^2}{2 \cdot S_2^2} - g \cdot H \quad (14)$$

Rovnice byly dány do rovnosti.

$$\frac{p_2}{\rho} + \frac{Q_2^2}{2 \cdot S_2^2} - g \cdot H = \frac{p_1}{\rho} + \frac{Q_1^2}{2 \cdot S_1^2} + g \cdot H \quad (15)$$

Byla vyjádřena dopravní výška H .

$$H = \frac{\frac{p_2}{\rho} + \frac{Q_2^2}{2 \cdot S_2^2} - \frac{p_1}{\rho} - \frac{Q_1^2}{2 \cdot S_1^2}}{2 \cdot g} \quad (16)$$

S_1 je obsah plicní tepny, dovádějící krev z pravé komory do plic, zatímco S_2 je obsah průřezu plicní žíly, v které proudí krev z plic do levé předsíně. Hodnoty průměrů vstupu a výstupu byly převzaty z předchozích prací, proto je průměr $d_2 = 18$ mm a $d_1 = 16$ mm. [28]

$$s_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,016^2}{4} \doteq 2,011 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$s_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,018^2}{4} \doteq 2,545 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$H = \frac{\frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{1}{2} \left(\frac{Q_2^2}{S_2^2} - \frac{Q_1^2}{S_1^2} \right)}{2 \cdot g} = \frac{\frac{9300 - 2000}{998,2} + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{0,15 \cdot 10^{-3}}{2,545 \cdot 10^{-4}} \right)^2 - \left(\frac{0,15 \cdot 10^{-3}}{2,011 \cdot 10^{-4}} \right)^2 \right)}{2 \cdot 9,81} = 0,367 \text{ m}$$

V tuto chvíli je znám návrhový bod, tudíž bude přepočítána délka lopatek opět pomocí afinních vztahů.

$$\frac{Y}{Y_0} = \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 \quad [29] \quad (17)$$

Měrnou energii Y nahradíme součinem dopravní výšky H a tíhového zrychlení g , které se vzájemně ve zlomku zkrátí.

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 \quad (18)$$

Veličiny s indexem nula budeme považovat za vstupní parametry, tudíž vyjádříme průměr navrhovaného kola D .

$$D = D_0 \cdot \sqrt{\frac{H}{H_0}} \quad (19)$$

Průměr měřeného oběžného kola D_0 je 67 mm, který dosadíme do rovnice.

$$D = 67 \cdot \sqrt{\frac{0,367}{1,5}} \doteq 33,1 \text{ mm}$$

Pro výpočet délky lopatky je potřeba přepočítat také průměr vyhodnoceného kola bez lopatek, které odpovídá 36,6 mm.

$$D' = 36,6 \cdot \sqrt{\frac{0,367}{1,5}} \doteq 18,1 \text{ mm}$$

Výsledná délka lopatky l je vypočítána triviálně podle následujícího vzorce.

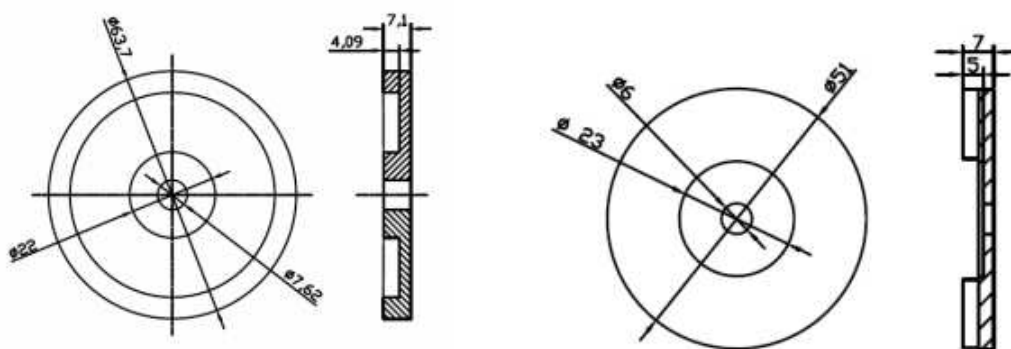
$$l = \frac{D-D'}{2} = \frac{33,1-18,1}{2} = 7,5 \text{ mm}$$

5 KONSTRUKČNÍ NÁVRH OBĚŽNÝCH KOL VÍŘIVÉHO ČERPADLA

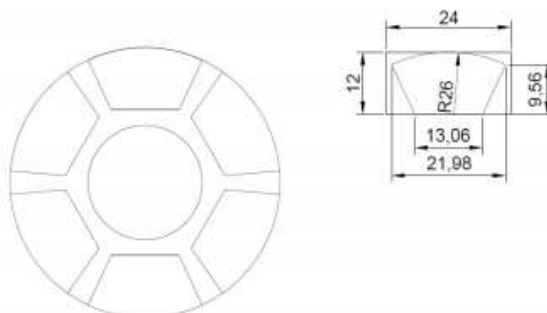
Při konstrukčním návrhu byly použity strojnické tabulky. [36]

5.1 MOTOR ČERPADLA

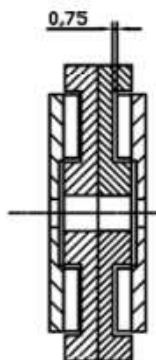
Motor, určený k pohánění vířivého čerpadla, byl pod vedením Ing. Rostislava Huzlíka Ph.D. navržen Bc. Davidem Lacinou, který ve své bakalářské práci Elektrický stroj s axiálním magnetickým tokem popsal a fyzicky zkonstruoval diskový motor. Skládá se ze dvou statorových a dvou rotorových částí. Princip je založen na otáčejících se permanentních magnetech. Geometrie motoru je znázorněna na následujících obrázcích.



Obrázek 31: Výkres statoru (vlevo) a rotoru (vpravo) [32]



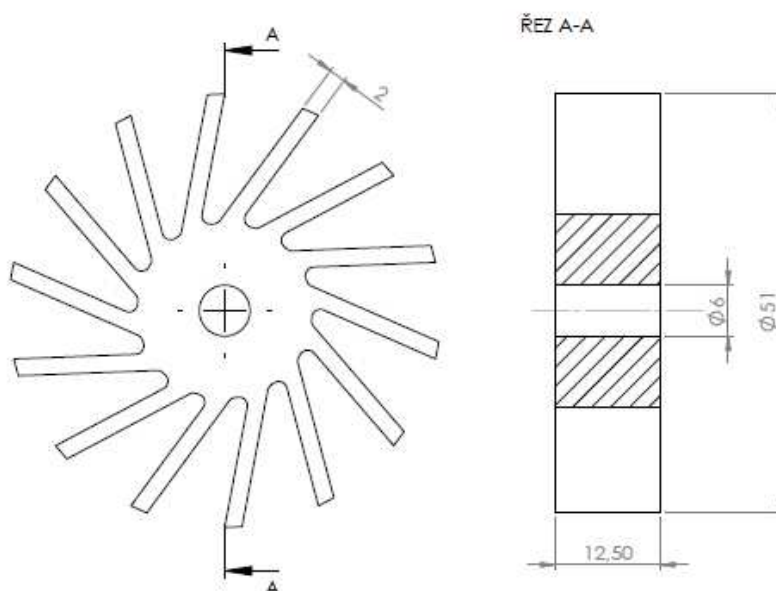
Obrázek 32: Umístění permanentních magnetů rotoru [32]



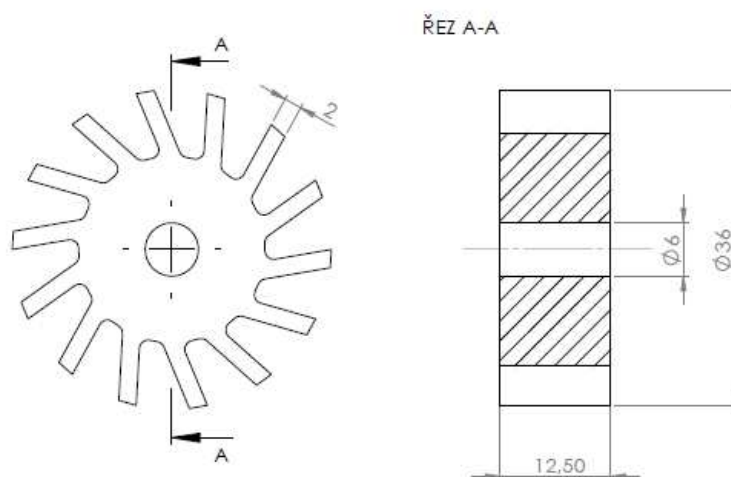
Obrázek 33: Průřez konstrukcí diskového motoru [32]

5.2 OBĚŽNÁ KOLA

K rotoru motoru budou upnuta obě oběžná kola, tudíž bylo možné zmenšit průměr oběžných kol na příslušný průměr rotoru, avšak délka lopatek byla zachována. Průměr levého oběžného kola byl zredukován na 51 mm a v případě pravého dokonce na 36 mm díky kratším lopatkám. Tloušťka kola zůstala nezměněna 12,5 mm, taktéž tloušťka lopatky 2 mm i úhel sklonu lopatky 103° .



Obrázek 34: Výkres oběžného kola levého čerpadla

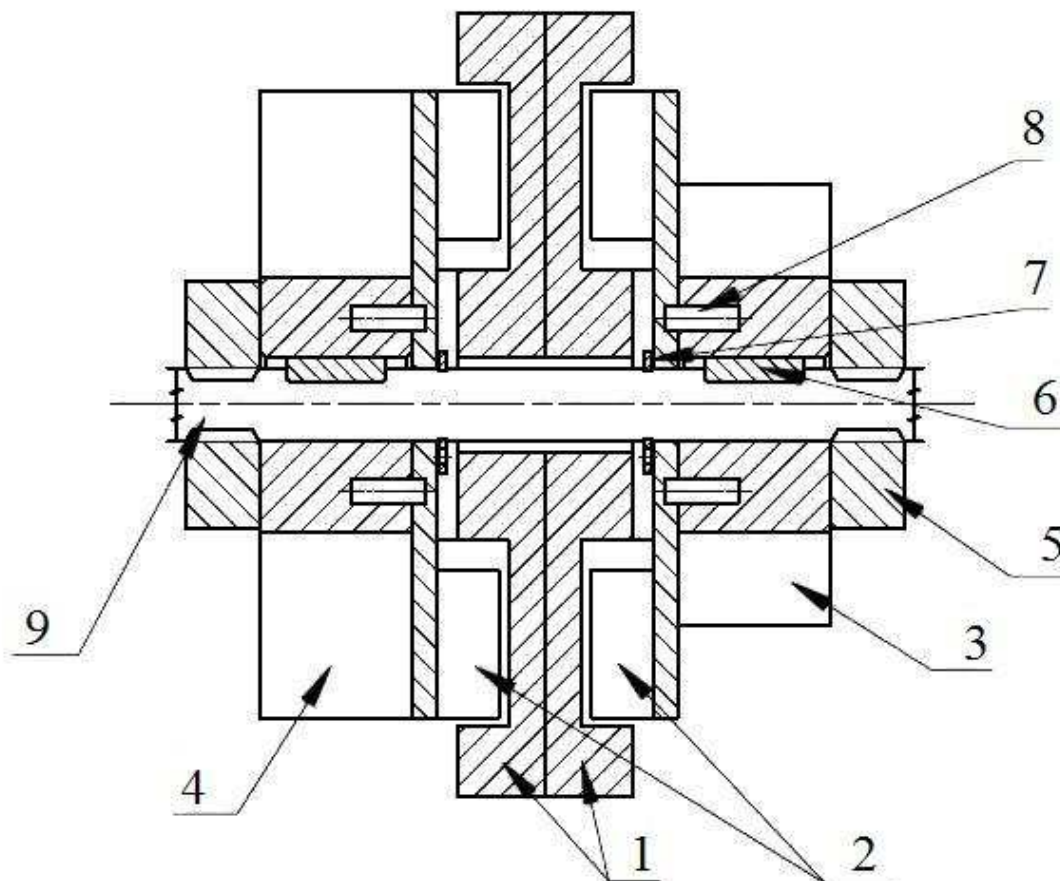


Obrázek 35: Výkres oběžného kola pravého čerpadla

5.3 NÁVRHY UPNUTÍ OBĚŽNÝCH KOL K ROTORU MOTORU

Byly zkonstruovány tři různé návrhy, jak lze připojit oběžné kolo k rotoru (viz níže).

PRVNÍ VARIANTA



Obrázek 36: Výkres první varianty upnutí oběžných kol

Popis jednotlivých částí:

1 – dva statory motoru

2 – dva rotory motoru

3 – oběžné kolo pravého čerpadla

4 – oběžné kolo levého čerpadla

5 – matice

6 – pero

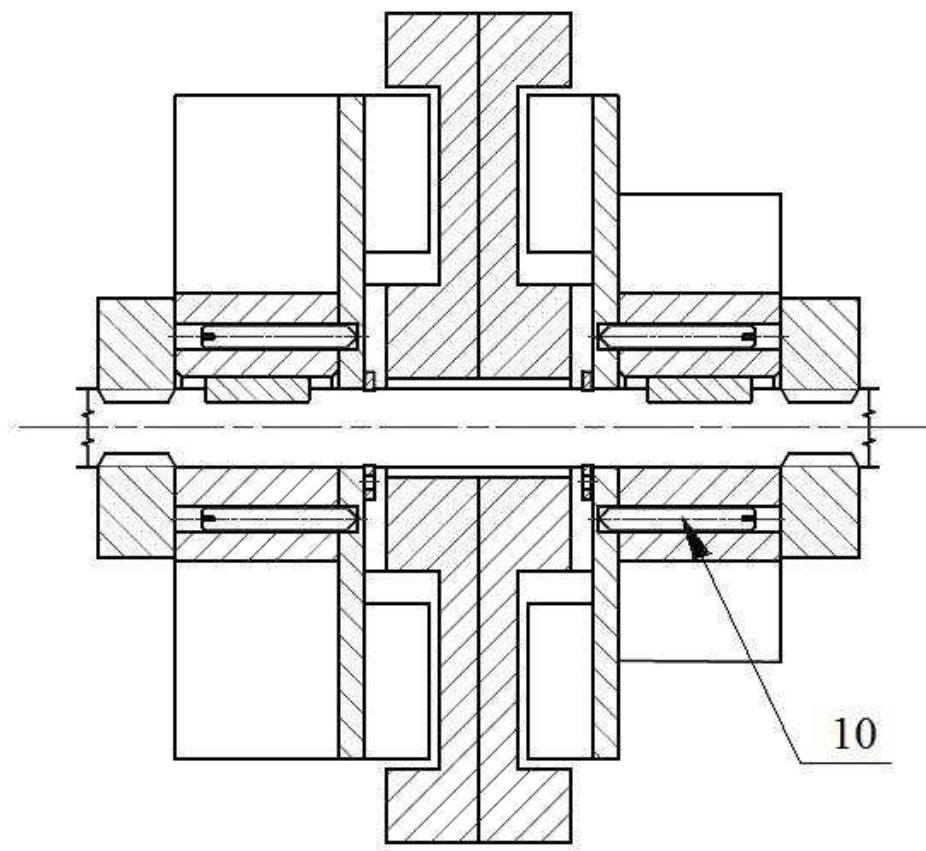
7 – pojistný kroužek

8 – kolík

9 – hřídel

V první variantě je každé z oběžných kol spojené s rotory čtyřmi kolíky, dohromady je tedy použito osm kolíků na přenos krouticího momentu mezi jednotlivými rotujícími částmi. Krouticí moment je zapotřebí transportovat i mezi hřídelí a rotorem, tudíž bylo navrženo použití dvou per, která byla umístěna v místech oběžných kol (každé na jednom kole). Pohyblivé části byly zajištěny také axiálně – dvěma oblými maticemi z vnějších stran a dvěma pojistnými kroužky z vnitřních stran, vymezujících vůli mezi rotorem a statorem, který bude pevně upnut ve skříni čerpadla.

DRUHÁ VARIANTA



Obrázek 37: Výkres druhé varianty upnutí oběžných kol

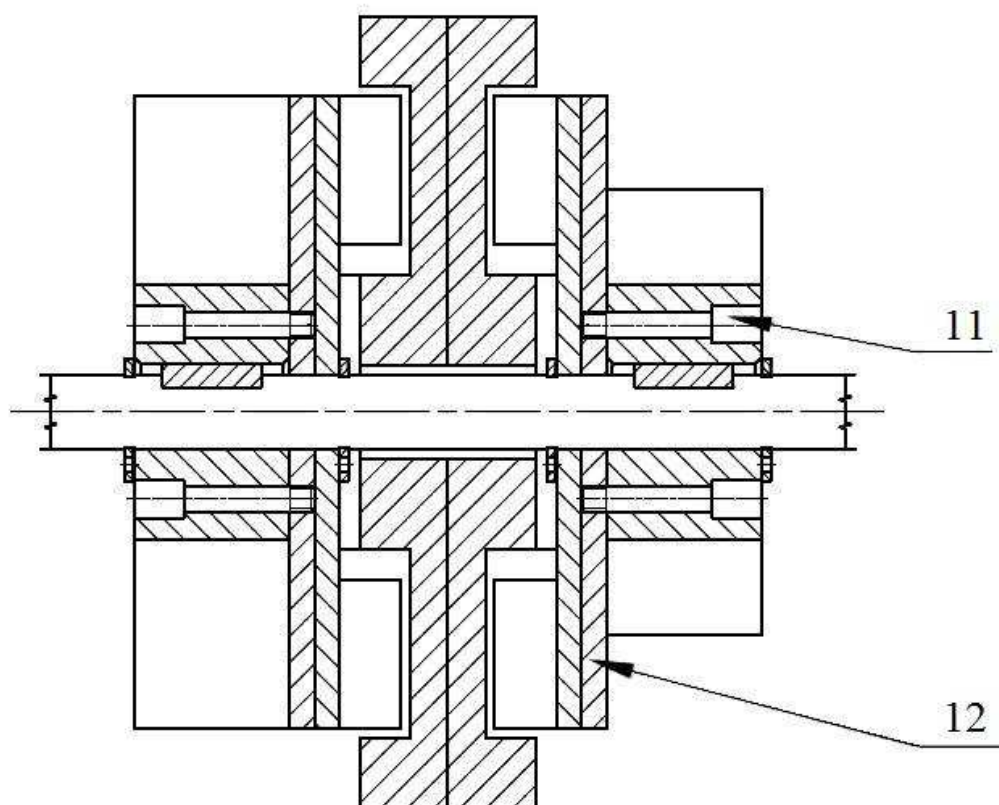
Popis jednotlivých částí:

10 – stavěcí šroub

ostatní části - viz obrázek 36

Sestava druhé varianty je téměř totožná s první variantou jen s rozdílem, že krouticí moment je na každém kole přenášén pomocí čtyř stavěcích šroubů, pro které byly vyvrtány příslušné závitové díry v oběžných kolech i rotorech.

TŘETÍ VARIANTA



Obrázek 38: Výkres třetí varianty upnutí oběžných kol

Popis jednotlivých částí:

11 – kovová destička

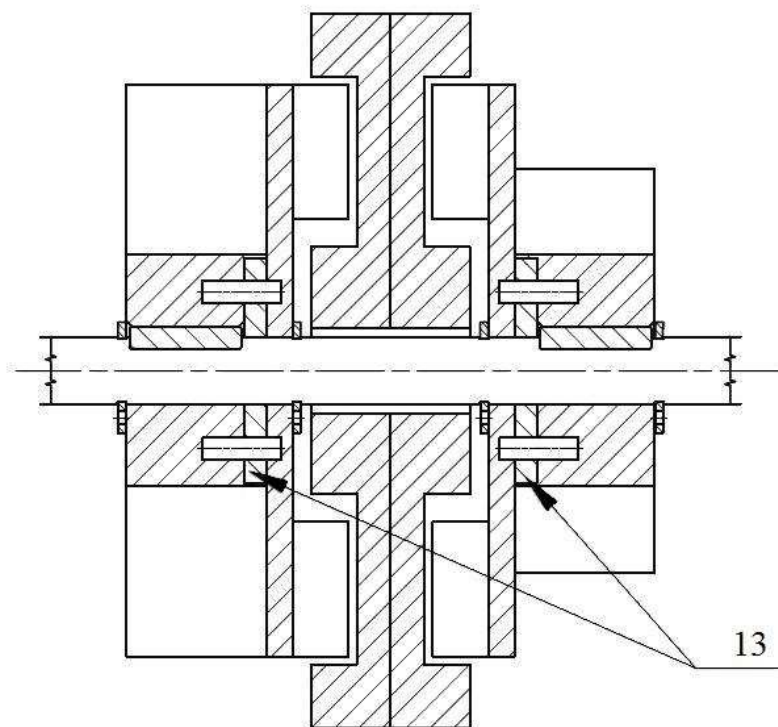
12 – čep na konci se závitem

ostatní části - viz obrázek 36

Myšlenkou tohoto návrhu jsou kovové destičky, k nimž jsou uchycena oběžná kola skrze čepy. V obou destičkách jsou vyvrtány čtyři díry se závitem, do kterých jsou čepy našroubovány. Tím, že jsou destičky vyrobeny z kovového materiálu, působí na ně magneticky přitažlivé síly od permanentních magnetů rotorů motoru. Spojení rotujících částí je tedy vyřešeno těmito přitažlivými silami a kovovou destičkou, aniž by bylo nutné rotory obrábět. Axiálně jsou součásti zajištěny z obou stran pojistnými kroužky a krouticí moment je, stejně jako v předchozích variantách, přenášen pery.

5.4 FINÁLNÍ NÁVRH UPNUTÍ

Druhá varianta návrhu nebyla vhodná, jelikož je prototyp čerpadla vyráběn na 3D tiskárně, která závity z plastových materiálů tiskne jen s velkými obtížemi. Třetí varianta byla vyhodnocena jako nejlepší způsob uchycení skrze minimalizaci úprav rotorů. Přesto nebyla využita, protože by motor pracoval s nižším výkonem, tudíž i s nižší účinností. Jako konečná koncepce byla tedy vybrána první varianta s drobnými úpravami (viz obrázek 39).



Obrázek 39: Výkres konečného návrhu uchycení oběžných kol

Popis jednotlivých částí:

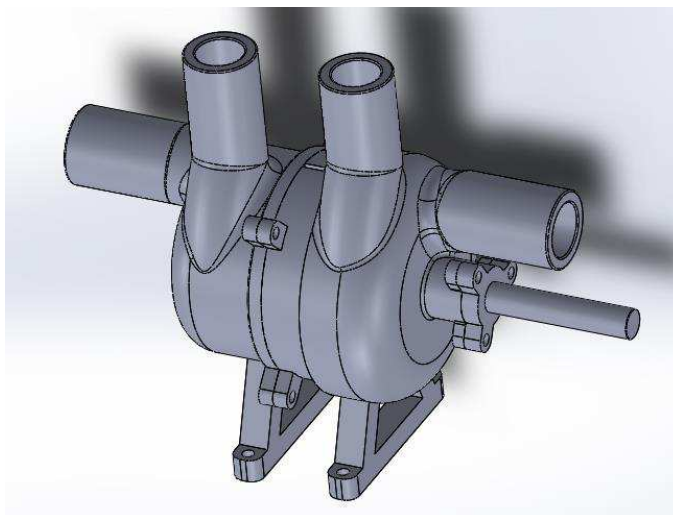
13 – kovová výztuha

ostatní části - viz obrázek 36

První varianta se liší oproti konečné koncepci uchycením rotačních částí v axiálním směru – obě strany jsou zajištěny pojistnými kroužky. Dále byla zvětšena délka pera, což vychází z pevnostních výpočtů (viz. v dalších částech kapitoly). Poslední rozdíl spočívá v kovových výztuhách, které jsou přilepeny k rotorům. Polovina kontaktní plochy kolíku zasahuje do kovové výztuhy a rotoru a druhá do plastového oběžného kola, proto na obě poloviny kontaktních ploch kolíku působí stejně velká síla. Pera i kolíky jsou mechanicky namáhané součásti, které je potřeba ověřit z hlediska bezpečnosti pevnostními výpočty. Průhyb hřídele je zanedbáván.

Model této varianty s krytováním i ložisky je znázorněn na obrázek 40, byl vytvářen v modelovacím programu SolidWorks. Tvary výstupních a vstupních částí obou čerpadel byly navrženy v souladu s nejnižšími možnými ztrátami podle zdroje [37], stejně jako v přechozích modelech vířivých čerpadel. Byla použita dvě jednořadá kuličková

ložiska, která byla umístěna z vnějších stran oběžných kol. Je nutné říci, že byl model upraven pro experimentální měření hydraulických charakteristik, z toho důvodu byla hřídel vyvedena ven z čerpadla, aby na ni mohla být připojena měřicí technika. Taktéž byly přidány některé konstrukční prvky jako příruba či stojany na lepší uchycení synchronních čerpadel k pracovní podložce.



Obrázek 40: Krytování konečného návrhu

5.4.1 PEVNOSTNÍ VÝPOČTY

KONTROLA OTLAČENÍ – PERO, HŘÍDEL, NÁBOJ

Kontrola probíhá tak, že se vždy prověřuje jen ta součást, která má nejhorší mechanické vlastnosti z hlediska otlačení. [34]

Hřídel i pero se vyrábí z oceli, zatímco náboj je umístěn v plastovém oběžném kole. V 3D tisku se používá plast typu ABS, jehož základní hodnota tlaku p_0 je přibližně 20 MPa, zatímco v případě oceli se tato hodnota pohybuje kolem 150 MPa, tudíž bude v pevnostním výpočtu vyhodnocen ABS plast. [34], [35]

Znamé veličiny:

$$M_k \doteq 0,321 \text{ Nm} \quad (\text{maximální hodnota z experimentu při otáčkách } 1000 \text{ min}^{-1})$$

$$n = 1000 \text{ min}^{-1}$$

Navrhuto:

$$\text{Hřídel:} \quad d = 6 \text{ mm}$$

$$\text{Drážka:} \quad l_p = 10 \text{ mm}$$

$$b = t = 2 \text{ mm}$$

Výpočet obvodové síly F :

$$F = \frac{2 \cdot M_k}{d_{hřidel}} [34] \quad (20)$$

$$F = \frac{2 \cdot 0,321}{0,006} = 107 \text{ Nm}$$

Výpočet dovoleného tlaku p_D :

$$p_0 = 20 \text{ MPa} [34]$$

$$p_D = 0,8 \cdot p_0 [34] \quad (21)$$

$$p_D = 0,8 \cdot 20 = 16 \text{ MPa}$$

Aby nedocházelo k otlačení náboje, musí platit tato nerovnice.

$$t_1 = 0,9 \text{ mm}$$

$$p_D \geq \frac{F}{t_1 \cdot (l_P - b)} [34] \quad (22)$$

$$16 \geq \frac{107}{0,9 \cdot (10 - 2)}$$

$$16 \geq 14,861 \cdot$$

Nerovnice je splněna, tudíž nebude docházet k otlačení náboje.

KONTROLA OTLAČENÍ – KOLÍKY

Jako v předchozím pevnostním výpočtu, i zde je analýza vztahována k plastovému materiálu, jelikož má horší mechanické vlastnosti při působení otlačení jako ocel.

Znamé veličiny:

$$M_k = 0,321 \text{ Nm}$$

$$p_D = 16 \text{ MPa} \quad (\text{vycházíme z předchozího pevnostního výpočtu})$$

$$D_{roztec} = 14 \text{ mm}$$

Navrhuto:

$$\text{Kolík:} \quad d = 2 \text{ mm}$$

$$l_K = 8 \text{ mm}$$

Opět musí být platná nerovnice.

$$p = \frac{F}{S} = \frac{\frac{2 \cdot M_k}{D}}{\frac{l_K \cdot d}{2}} \leq p_D [34] \quad (23)$$

$$p = \frac{4 \cdot M_k}{D \cdot d \cdot l_K} \leq p_D \quad (24)$$

$$\frac{4 \cdot 0,321}{0,014 \cdot 0,002 \cdot 0,004} \leq 16 \cdot 10^6$$

$$5,732 \cdot 10^6 \leq 16 \cdot 10^6$$

Nerovnice je platná, vypočítaná jen pro jeden kolík.

Podle návrhu počítáme se čtyřmi kolíky.

$$\frac{p}{4} \leq p_D \quad (25)$$

$$1,433 \cdot 10^6 \leq 16 \cdot 10^6$$

Nerovnice je taktéž splněna.

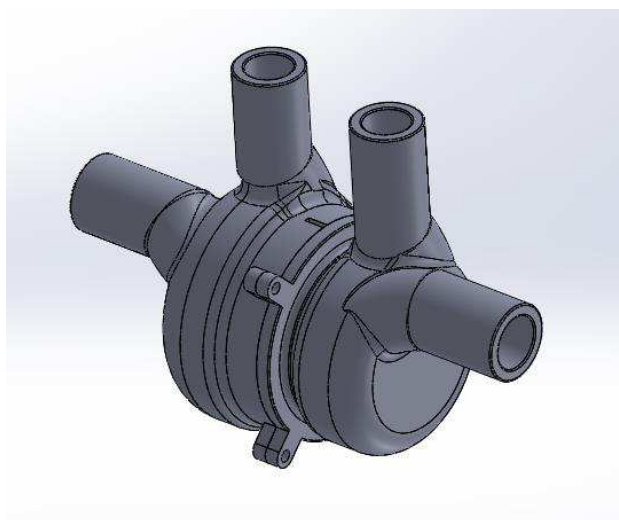
5.5 IDEOVÝ NÁVRH

Předchozí koncepce je navržena, tak aby byla vhodná i pro laboratorní měření, zatímco tento návrh je uzpůsoben tak, aby se blížil návrhu, který bude určen přímo pro člověka.

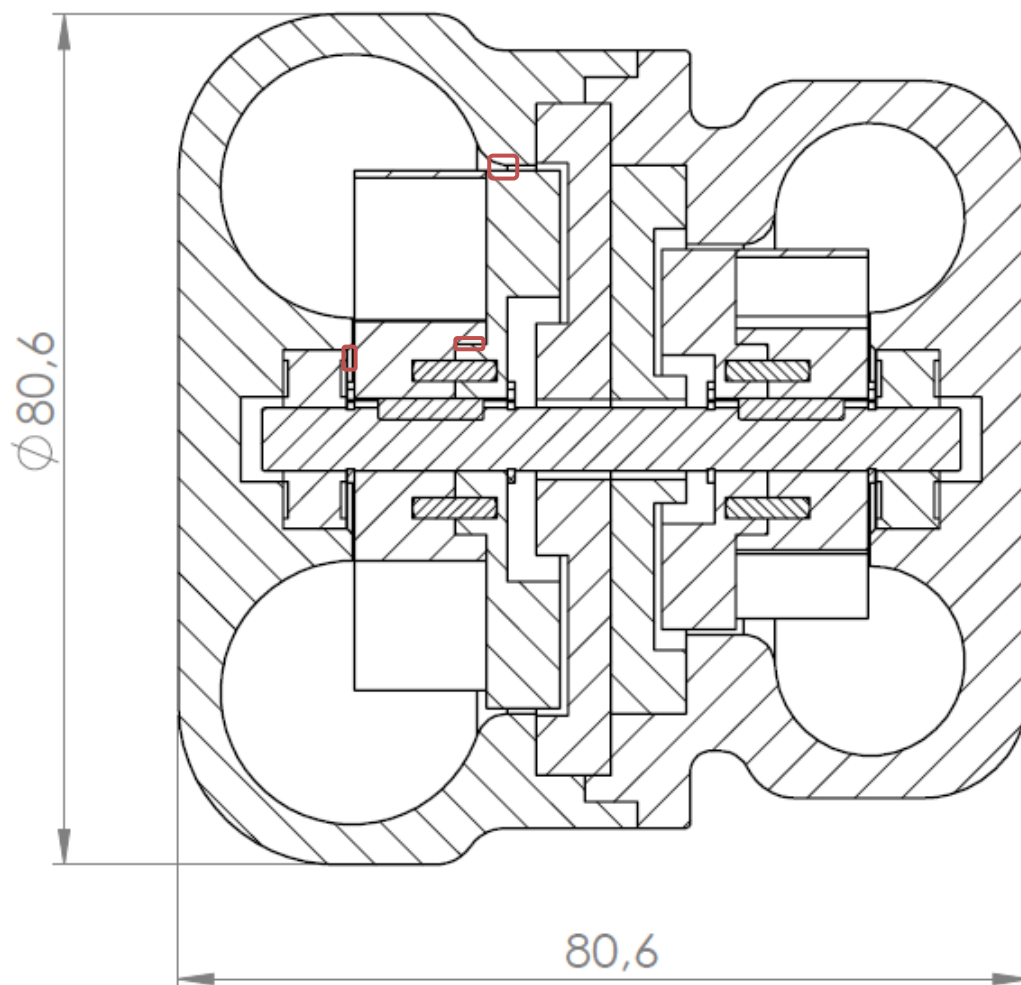
Umělé srdce má být navrženo z biokompatibilních materiálů kvůli možnému vzniku hemolýzy krve, z tohoto důvodu byl jako hlavní materiál čerpadla zvolen titan a jeho slitiny. Je nežádoucí, aby se krev obou čerpadel mísila, proto je navržena v určitých místech ucpávka, konkrétně magnetická ucpávka, jejímž studiem se ve své diplomové práci zabývá Bc. Kryštof Jančík. Ucpávky jsou schematicky naznačeny červenými rámečky v jedné čtvrtině modelu na obrázku 42 (v ostatních částech sestavy by byly použity obdobně). Doposud žádné ucpávky navrženy nebyly, ani v případě měření experimentu, jelikož jedinými ucpávkami, které mohly být eventuálně použity, byla pryžová těsnění známá pod názvem gufera. Ty však způsobují velké ztráty výkonu motoru.

Průměr pravého oběžného kola čerpadla je menší než rotor motoru, proto je výhodné zmenšit i průměr rotoru a statoru, čímž se nepatrně zredukuje celkové rozměry umělého srdce. Malé tvarové změny jsou provedeny i v krytování. Hřídel již není vyvedena ven z modelu umělého srdce. Většina součástí, včetně spojovacího materiálu, je taktéž upravena a použita tak, aby se předešlo případnému lepení dílů.

Ideový návrh je znázorněn na následujících obrázcích.



Obrázek 41: Model ideového návrhu umělého srdce



Obrázek 42: Výkres sestavy ideového návrhu v řezu

Co se týče motoru čerpadla, je stejně jako v předchozím návrhu použit diskový motor, který vyvíjí Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D. Motor však není ve stavu zaručující správnou funkčnost, a proto by bylo vhodné ho pro další vývoj koupit či nechat vyrobit na zakázku od některé z firem, zabývajících se těmito zařízeními – jmenovitě Maxon Motor, Kollmorgen, Portescap či Baumüller.

6 CFD VÝPOČET

CFD výpočet je počítán pouze pro návrhový bod synchronních čerpadel, který bude následně srovnán s experimentem. Pro samostatný výpočet bylo možné použít program ANSYS Fluent nebo ANSYS CFX. Jelikož je geometrie čerpadla složitá, byl zvolen program CFX z důvodu snazšího konvergování, ale na úkor výpočetního času, který je delší oproti ANSYS Fluentu.

Pracovní kapalinou byla nastavena voda, jež je také použita při experimentu.

Výpočetním modelem byl zvolen $k-\varepsilon$, který řeší v rámci výpočtu šest rovnic a používá se pro vířivé proudění. Další vhodný model je *Reynolds stress model (RSM)* využívající se pro silně zavířené prostředí, avšak ten počítá jedenáct rovnic v rámci řešení úlohy, tudíž je časově náročnější a také hůře konverguje. Byla snaha použít oba výpočetní modely a vzájemně srovnat jejich výsledky, ale bohužel *RSM model* divergoval, proto byl využit jen model $k-\varepsilon$ se stěnovou funkcí *Scalable wall functions*.

6.1 MODEL

Pro CFD výpočet byl použit konstrukční model z programu SolidWorks, importovaný do ANSYS Modeleru. Zde byl rozdělen na dva statory a dva rotory, jelikož bylo nezbytné, aby byly odděleny rotující a nehybné části pro nastavení okrajových podmínek v CFX. Výstupy synchronních čerpadel byly upraveny tak, aby jejich délka byla nejméně třikrát větší, než je průměr výstupního potrubí skrze definování okrajové podmínky *Pressure outlet* (viz. dále).

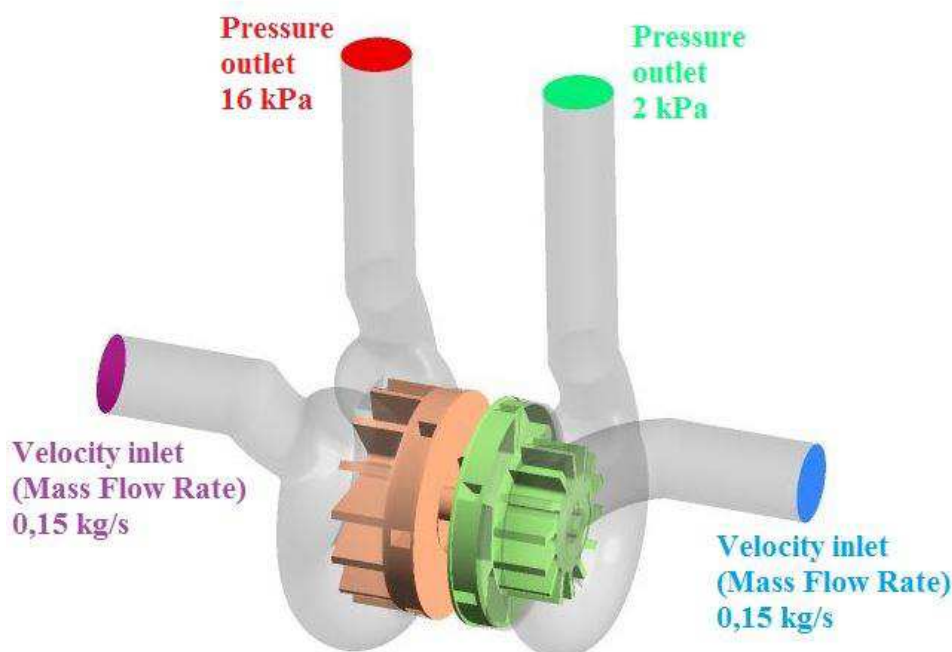
6.2 VÝPOČETNÍ SÍŤ

Ve většině objemů byla vytvořena tetrahedrální výpočtová síť s částmi hexahedrální sítě kvůli problematické geometrii. Byla snaha vytvořit příkazem *Inflation* mezní vrstvy zejména na lopatkách oběžného kola a v kanále čerpadla, ale bohužel program CFX nebyl schopen spustit výpočet. Proto byla vypracována síť s vyšším počtem buněk – přibližně do 15 mil. Důraz byl kladen na hodnotu stěnové funkce y^+ , která by neměla překročit hodnotu 120. [38] Stěnová funkce y^+ dosáhla hodnoty 81,7 – což bylo považováno jako vyhovující.

6.3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Do CFX byly vloženy čtyři domény – dvě z nich jsou rotory a další dvě statory. Statory byly nastaveny příkazem *Stationary* jako nepohybující součásti, zatímco rotory příkazem *Rorating* jako otáčející se, přičemž byl definován jejich rotující pohyb pomocí otáček 1000 min^{-1} . Oběma statorům byly přidány okrajové podmínky na vstupu i výstupu podle obrázku 43.

Jako poslední byly vytvořeny plochy neboli *Interfaces* mezi odpovídajícími si statory a rotory i mezi oběma rotory v místě spojení obou čerpadel. V příkazu *Interfaces* byly nastaveny všechny jako *Frozen Rotor*, což bylo využito jen pro stacionární proudění. Při výpočtu nestacionárního proudění byly všechny přepnuty na *Transient Rotor Stator*.



Obrázek 43: Okrajové podmínky vstupu a výstupu

6.4 STACIONÁRNÍ VÝPOČET

Výpočet byl spuštěn nejdříve jako stacionární neboli *Steady* na prvních řádech přesnosti (*First Order*), poté byl přepnut na vyšší řády přesnosti řešení (*High resolution*). Konvergence byla ustálena asi za 3000 iterací. Výsledky nebudou prezentovány, neboť je zapotřebí spočítat ještě nestacionární proudění kapaliny ve vířivém čerpadle.

6.5 NESTACIONÁRNÍ VÝPOČET

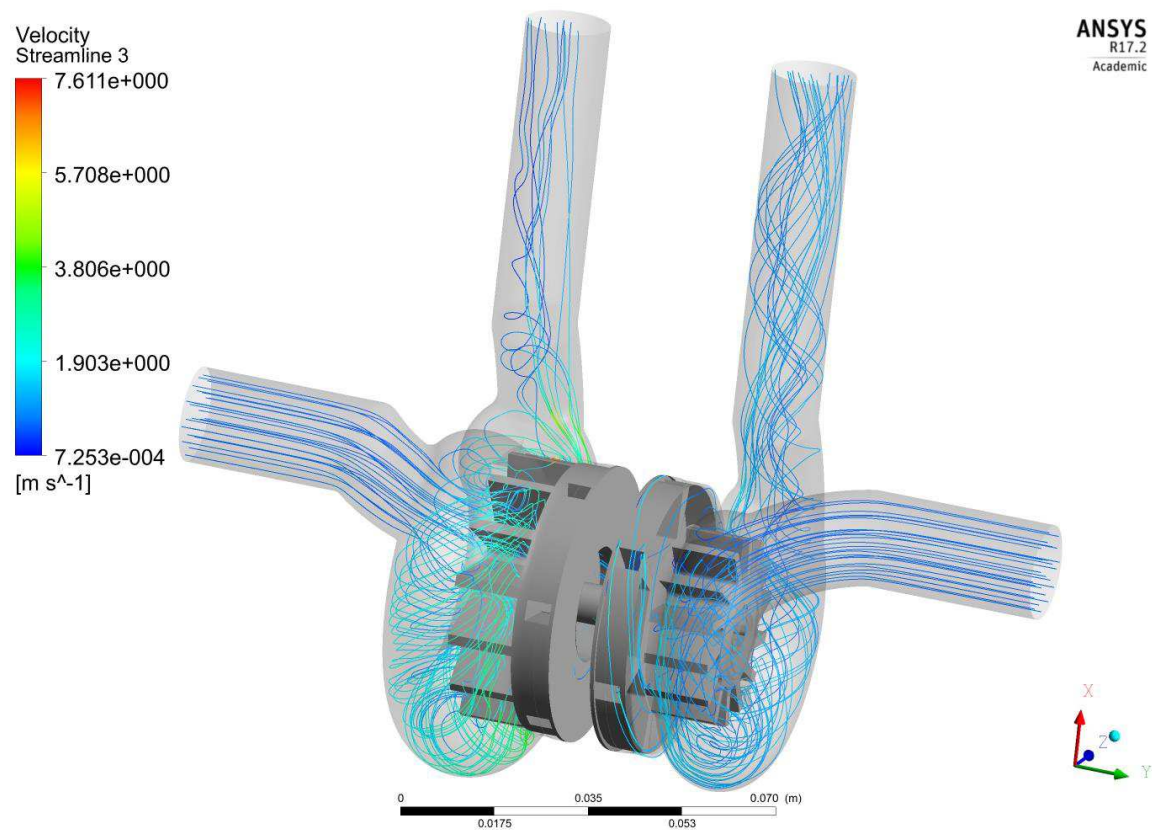
Byl nastaven po dosažení konvergence. Jak už bylo zmíněno dříve, plochy definované jako *Interfaces* byly přenastaveny z *Frozen rotor* na *Transient Rotor Stator*. Časový krok byl zvolen 0,0005 s, což odpovídá 3° otočení rotoru. Vypočítáno bylo 5,5 otáček čerpadla, jelikož hodnoty residuí nikterak neklesaly.

6.6 VÝSLEDKY

Výsledky byly vyhodnoceny v CFX Postu.

PROUDNICE

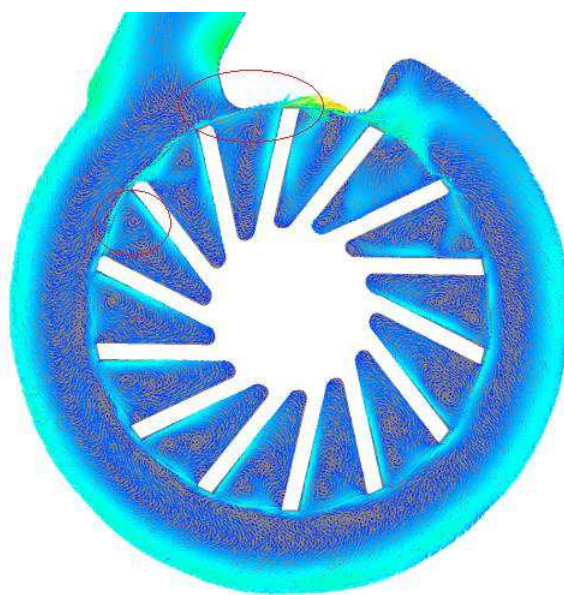
Vykreslení proudnic znázorňuje trajektorii proudění kapaliny.



Obrázek 44: Proudnic synchronních vířivých čerpadel

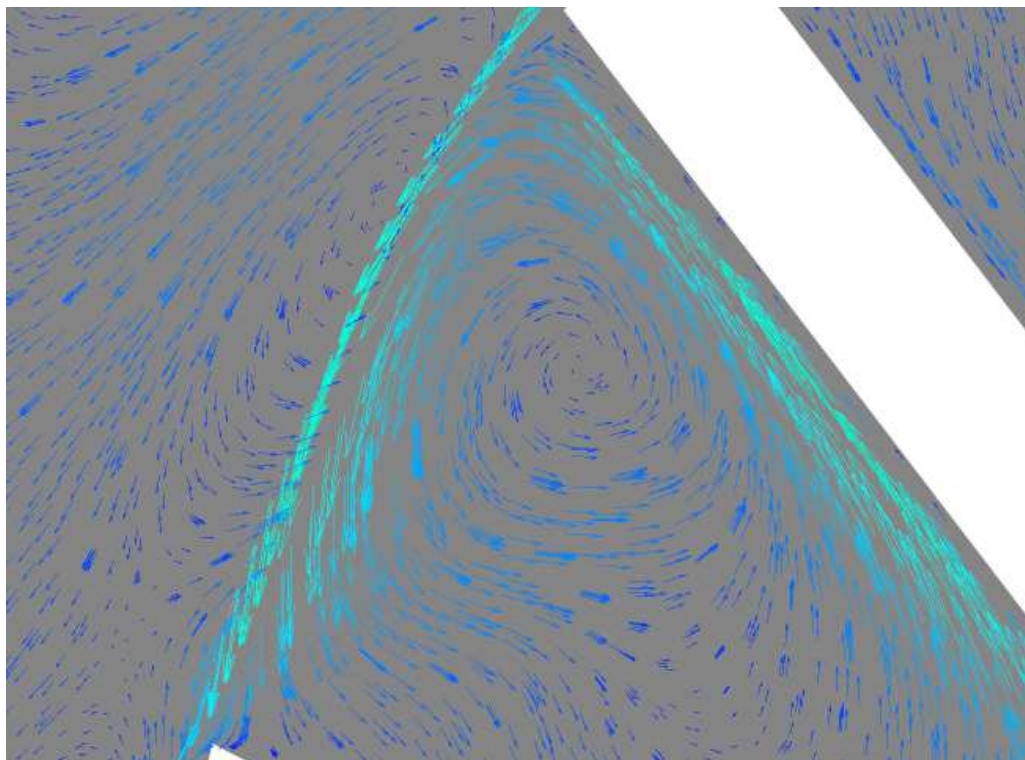
LOKÁLNÍ VÍRY MEZI LOPATKAMI

Levé kolo

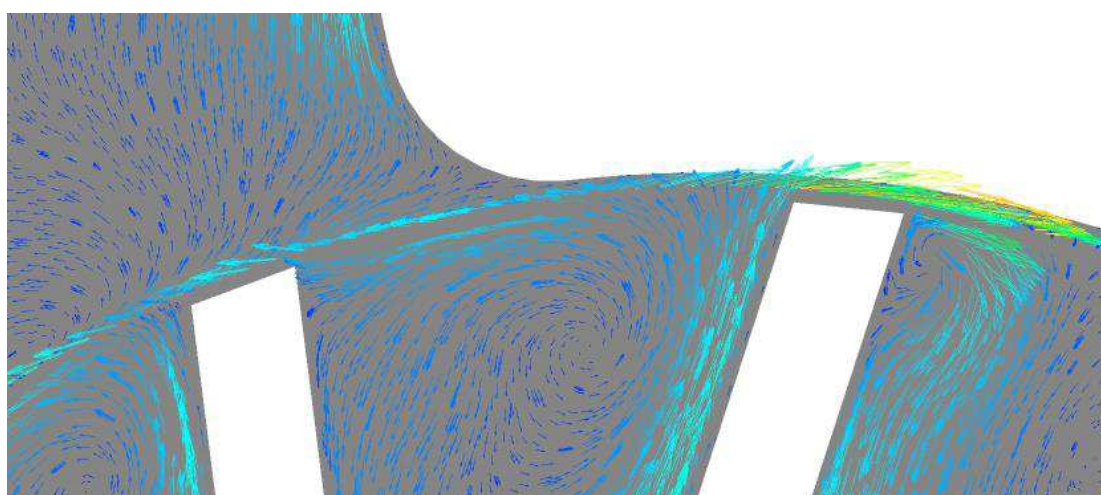


Obrázek 45: Vykreslení vektorů rychlosti v mezilopatkovém prostoru

Obrázek 45 slouží k orientaci v následujících dvou obrázcích, na jednom je znázorněn lokální vír a na druhém proudění v místě spáry oddělovače. Vznik lokálního víru je principem vířivého čerpadla. V ideálním případě se tvoří jen jeden vír mezi lopatkami, avšak v některých oblastech byly nalezeny dva i tři víry. Tekutina proudí i ve spáře oddělovače, neboť nebyly navrženy pro experiment žádné ucpávky. Rychlost proudění se zde zvyšuje.

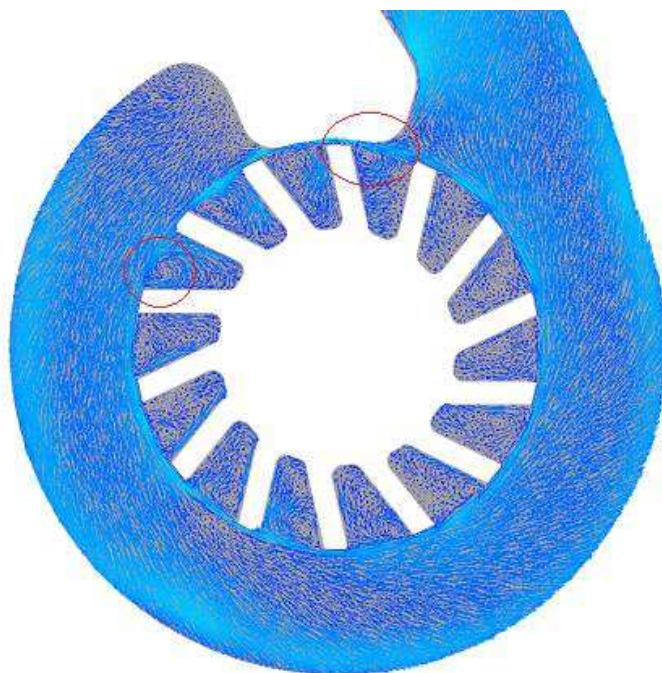


Obrázek 46: Lokální vír mezi lopatkami



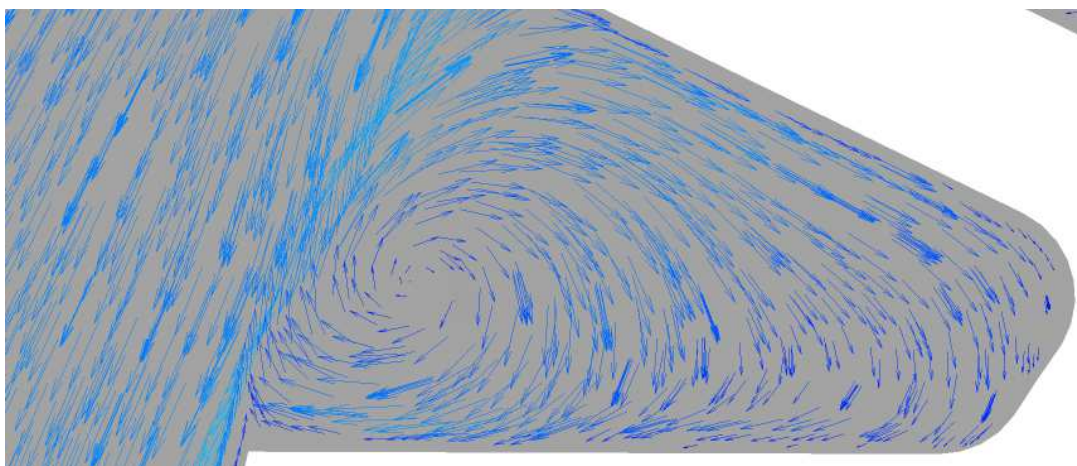
Obrázek 47: Proudění kapaliny v prostoru spáry

Pravé kolo

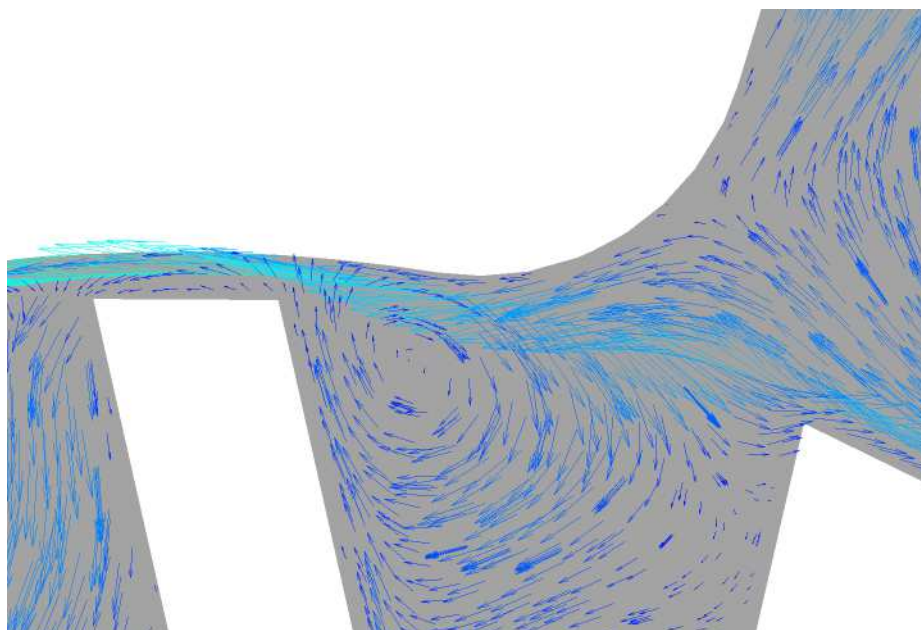


Obrázek 48: Zobrazení vektorů rychlosti v mezilopatkovém prostoru

Obrázek 48 taktéž slouží pro orientaci v dalších dvou obrázcích, kde je opět vykreslen lokální vír v mezilopatkovém prostoru a proudění tekutiny ve spáře oddělovače. Taktéž v některých oblastech nevznikal jen jeden vír, nýbrž dva nebo tři. Rychlost proudění tekutiny v místě spáry se také zvyšuje, ale nikoliv tak rapidně jako v případě levého čerpadla.



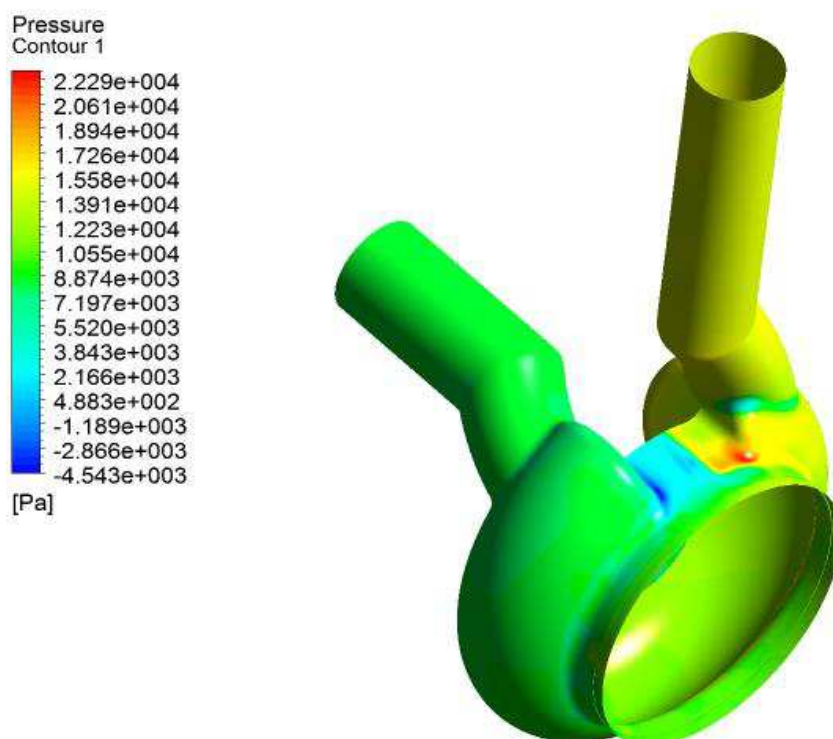
Obrázek 49: Lokální vír mezi lopatkami



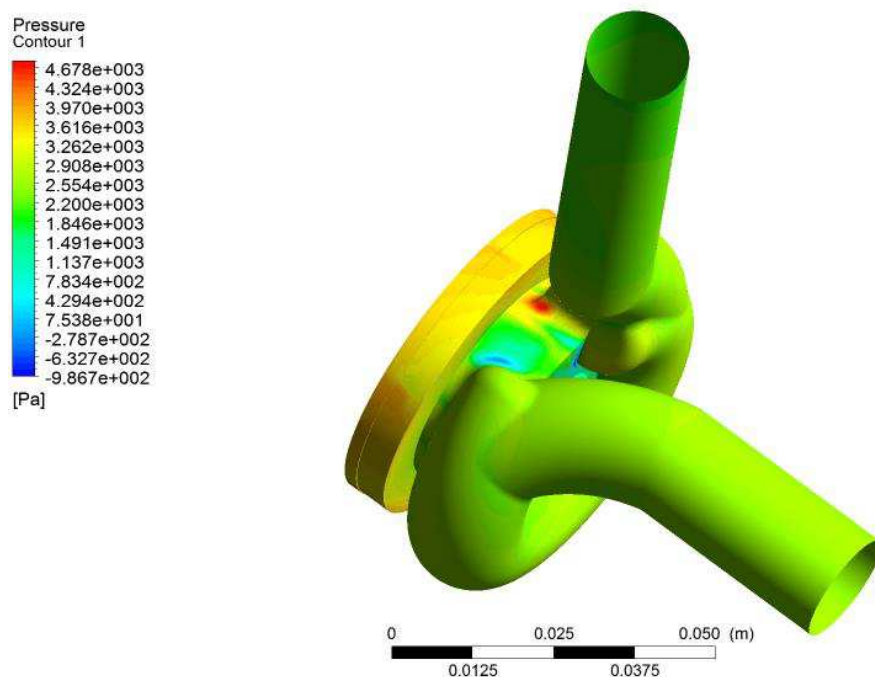
Obrázek 50: Proudění kapaliny v prostoru spáry

TLAKOVÉ ROZLOŽENÍ

Vyhodnoceny byly oba statory. V obou případech byl zjištěn podtlak v místě sání, který se pohyboval kolem 4,5 kPa u levého čerpadla, u pravého okolo 1 kPa. Na výtlaku naopak byl zaznamenán vyšší tlak – u levého 22,85 kPa, u pravého 4,8 kPa.



Obrázek 51: Tlakové rozložení levého statoru



Obrázek 52: Tlakové rozložení pravého statoru

SMYKOVÉ NAPĚTÍ

Hodnota maximálního smykového napětí ve vířivém čerpadle byla stanovena 297 Pa.

VYHODNOCENÉ VELIČINY

Veličiny byly spočítány programem CFX Post kromě účinnosti, ta byla stanovena podle vzorce níže.

$$\eta = \frac{\rho g H Q}{P_r} = \frac{\rho g H Q}{M_k} \quad [27] \quad (26)$$

	Levé čerpadlo	Pravé čerpadlo
Max. tlak statoru p_{max} [kPa]	22,85	4,8
Min. tlak statoru (podlak) p_{min} [kPa]	4,5	1
Tlaky na vstupu p_I [kPa]	8,6	2,7
Rychlosti na výstupu c_2 [m·s ⁻¹]	1,23	1,2
Dopravní výška H [m]	1,1	0,1
Momenty M_k [N·m]	-0,103	-0,0065
Axiální síly od rotoru F_R [N]	21,28	-2,56
Radiální síly od rotoru F_A [N]	4,23	0,19
Účinnosti η [%]	15,01	21,61

Obrázek 53: Tabulka vypočítaných veličin programem CFX

6.7 ZHODNOCENÍ

Spočívá ve vyhodnocení jednotlivých vypočítaných veličin oproti návrhu a také můžeme výsledky srovnat s fyziologickými parametry srdce.

Dopravní výška v obou případech nebyla splněna, což můžeme přisuzovat faktu, že nebyly navrženy žádné ucpávky, tím pádem docházelo k mísení kapaliny mezi oběma čerpadly. To není ani z fyziologického hlediska dobře. Docházelo tedy ke ztrátám, které zapříčinily nižší dopravní výšku levého i pravého čerpadla.

Průtok byl na vstupu obou čerpadel zadán a na výstupu byl po výpočtu zkontrolován, neboť by hodnoty měli být stejné. U levého čerpadla byl zjištěn nižší průtok asi o $0,014 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, zatímco u pravého byl průtok vyšší o $0,014 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Vzhledem ke vzniku ztrát v důsledku mísení tekutin je možné, že čerpadlo s vyšší dopravní výškou dodávalo část energie čerpadlu s nižší dopravní výškou.

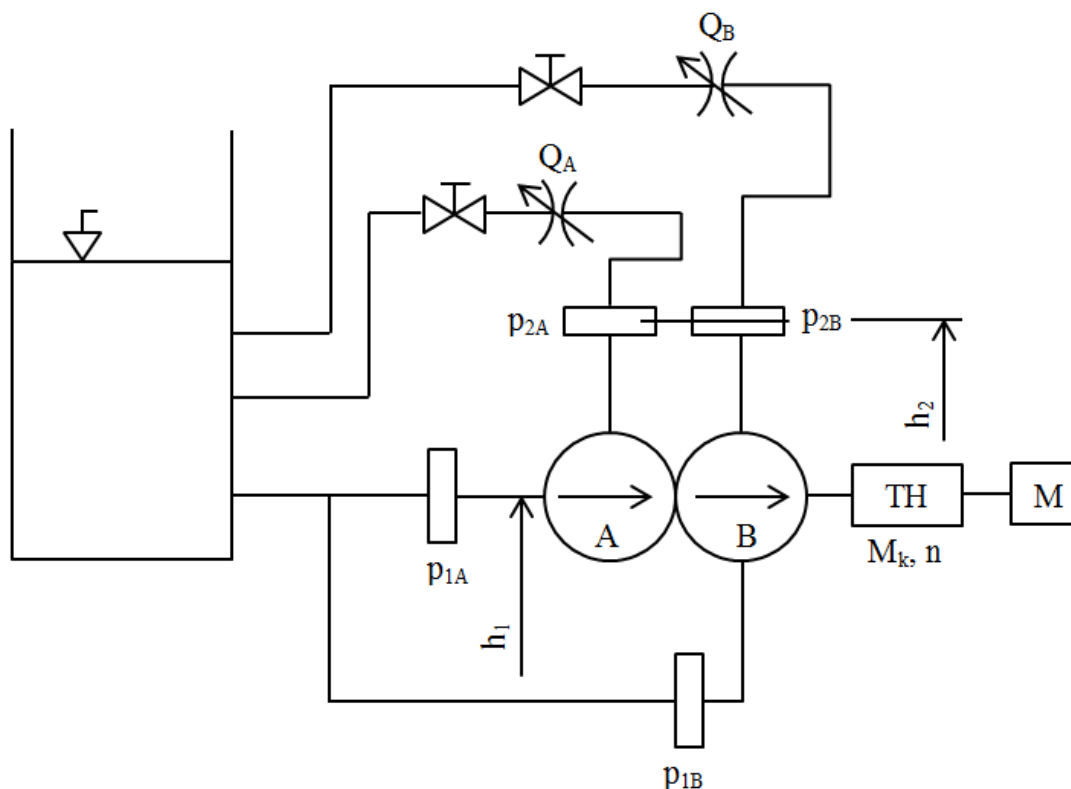
Tlakové rozložení výtlaku bylo definováno okrajovou podmínkou, tudíž můžeme zhodnotit jen tlaky v místě sání. V případě levého čerpadla byl stanoven nižší tlak oproti návrhovému bodu o $0,7 \text{ kPa}$, u pravého byl zjištěn vyšší tlak o $2,17 \text{ kPa}$. To může opět znamenat, že výpočet byl opět ovlivněn ztrátami obou čerpadel, způsobené skrze nepoužití ucpávek.

Co se týče smykových napětí z hlediska možné degradace krve, okamžitá hemolýza nastává přibližně od 600 Pa do 800 Pa , ale při cyklickém zatěžování dochází k rozpadu erytrocytů mnohem dříve – při smykových napětích od 150 do 250 Pa . [40] Avšak hodnoty těchto napětí se v různých literaturách liší řádově v desítkách pascalů. V našem výpočtu byla určena hodnota 297 Pa , která sice nezpůsobí okamžitou hemolýzu krve, ale při delším využívání vířivých synchronních čerpadel jako náhradu srdce, se dá předpokládat, že se červené krvinky pravděpodobně zaniknou.

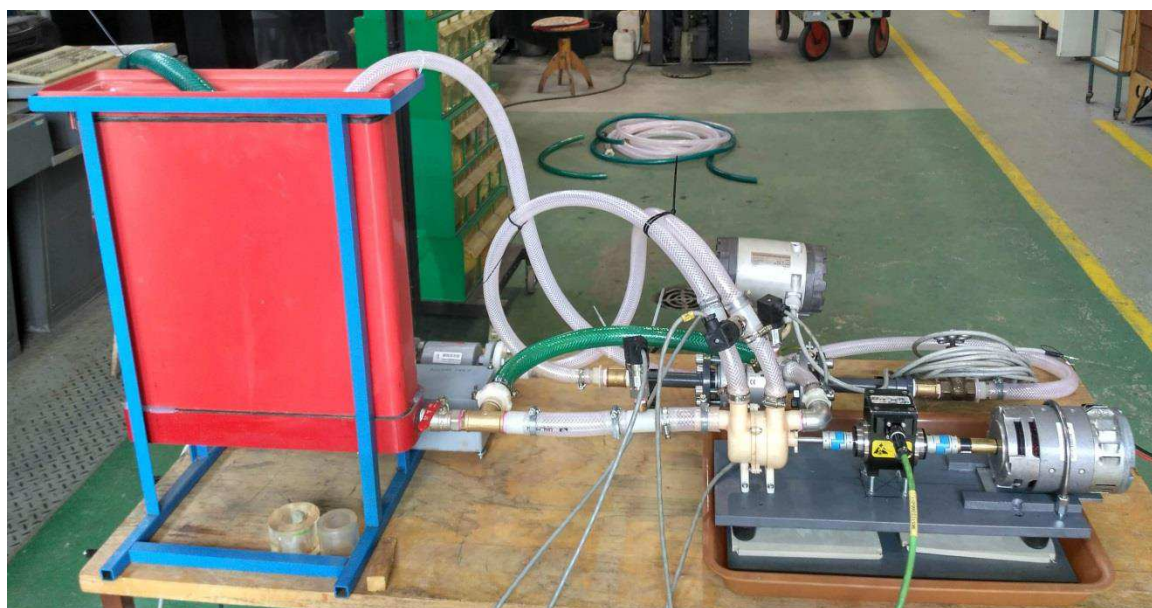
7 ZÁVĚREČNÝ EXPERIMENT

Pro experiment byla použita konstrukce modelu čerpadel z podkapitoly 5.4.

7.1 MĚŘÍCÍ TRAŤ



Obrázek 54: Schéma závěrečného experimentu



Obrázek 55: Sestavení experimentu v Hydraulické laboratoři

Měřicí trať závěrečného experimentu má podobnou stavbu jako trať počátečního experimentu. Avšak jsou měřena dvě čerpadla, tudíž jsou sestrojeny i dva okruhy. Okruh A i B se skládají ze stejných komponentů – regulační ventil, průtokoměr, dva snímače tlaků, které byly umístěny v oblasti sání a výtlaku čerpadla a samotné čerpadlo. Sací nádrž, elektromotor a tenzometrická hřídel byla společná pro oba okruhy. Tlakové snímače p_{1A} a p_{1B} jsou ve stejné výšce. Průměr potrubí odpovídal hodnotám z počátečního měření.

7.2 MĚŘENÉ VELIČINY

p_{A1}	– tlak v místě sání pravého čerpadla	kPa
p_{A2}	– tlak v místě výtlaku pravého čerpadla	kPa
p_{B1}	– tlak v místě sání levého čerpadla	kPa
p_{B2}	– tlak v místě výtlaku levého čerpadla	kPa
n	– otáčky čerpadla	min^{-1}
M_k	– krouticí moment	N·m
Q_A	– průtok na měřené trati ve větvi A	$\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$
Q_B	– průtok na měřené trati ve větvi B	$\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$

7.3 MĚŘÍCÍ TECHNIKA

p_{A1} – snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENZORS s.r.o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0 – 1,6 bar (A), přesnost $\pm 0,25$ % z rozsahu, proudový výstup 0–20 mA, v.č. 111160122

p_{A2} – snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENZORS s.r.o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0 – 1,6 bar (A), přesnost $\pm 0,25$ % z rozsahu, proudový výstup 0–20 mA, v.č. 111160122

p_{B1} – snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENZORS s.r.o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0 – 1,6 bar (A), přesnost $\pm 0,25$ % z rozsahu, proudový výstup 0–20 mA, v.č. 111160122

p_{B2} – snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENZORS s.r.o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0 – 1,6 bar (A), přesnost $\pm 0,25$ % z rozsahu, proudový výstup 0–20 mA, v.č. 111160122

M_k, n – tenzometrická hřídel TM 208 HS, výrobce Vibro-Meter, měřicí rozsah krouticího momentu 0 – 20 N·m, měřicí rozsah otáček 0 – 50000 min^{-1} , přesnost $\pm 0,001$ z rozsahu, frekvenční výstup 30 pulzů za otáčku, v.č. 415-208-000-111

Tenzometrická hřídel byla propůjčena z Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně.

Q_A – snímač průtoku MQI 99 - CN, výrobce Ela spol. s.r.o. Brno, DN 20, měřicí rozsah 0 – 5 m³·hod⁻¹, přesnost ±0,3 % z měřené veličiny, proudový výstup 4 – 20 mA, v.č. 10597

Q_B – snímač průtoku MQI 99 - CN, výrobce Ela spol. s.r.o. Brno, DN 20, měřicí rozsah 0 – 5 m³·hod⁻¹, přesnost ±0,3 % z měřené veličiny, proudový výstup 4 – 20 mA, v.č. 10597

7.4 VÝPOČÍTANÉ VELIČINY

Z naměřených hodnot byly vypočítány tyto veličiny:

Y – měrná energie čerpadla J·kg⁻¹

Pr – příkon čerpadla W

7.5 VÝPOČETNÍ VZTAHY

Měrná energie *Y* je určena podle rovnice (2). Hodnota příkonu *Pr* je stanovena podle následujícího vzorce.

$$Pr = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M_k \quad (27)$$

Pro zajímavost byly vypočítány také účinnosti obou čerpadel podle rovnice (26).

Stejně jako v případě počátečního experimentu, tak také v závěrečném byly vyhodnoceny nejistoty měření měrné energie podle vzorce (6) a příkonu podle (8). Jelikož byla počítána i účinnost, byla určena také nejistota měření účinnosti (viz níže).

$$u_{B\eta} = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial Y} + u_{BY}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial Q} + u_{BQ}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P} + u_{BP}\right)^2} \quad [27] \quad (28)$$

$$u_{B\eta} = \sqrt{\left(\frac{\rho Q}{P} + u_{BY}\right)^2 + \left(\frac{\rho Y}{P} + u_{BQ}\right)^2 + \left(\frac{\rho QY}{P^2} + u_{BP}\right)^2} \quad [27] \quad (29)$$

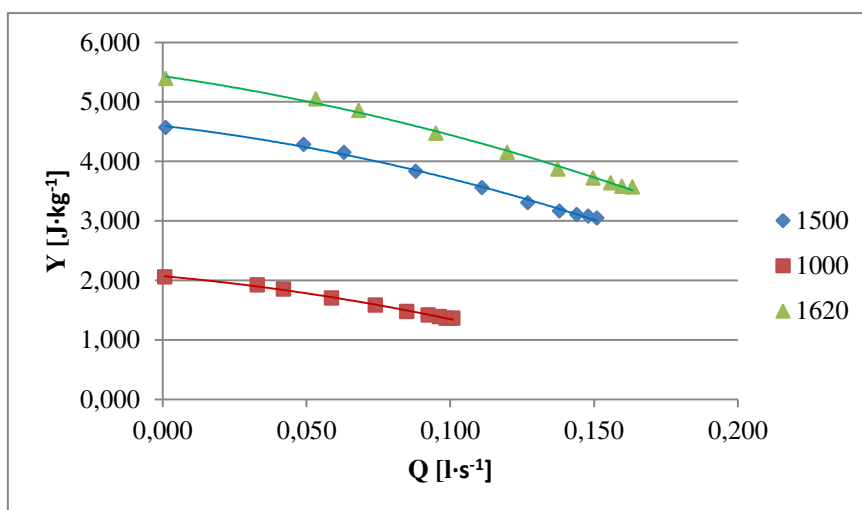
7.6 VYHODNOCENÍ

Nejdříve byla změřena data, která vypovídají o charakteristice samotného čerpadla. Teprve poté byl zaznamenán společný chod obou čerpadel, přičemž měření probíhalo tak, že jedno čerpadlo pracovalo při maximálním průtoku a druhému byl průtok snižován až do závěrného bodu a naopak. Veškerá data byla měřena při otáčkách 1500 min⁻¹ a poté pomocí afinních vztahů přepočítané na příslušné otáčky.

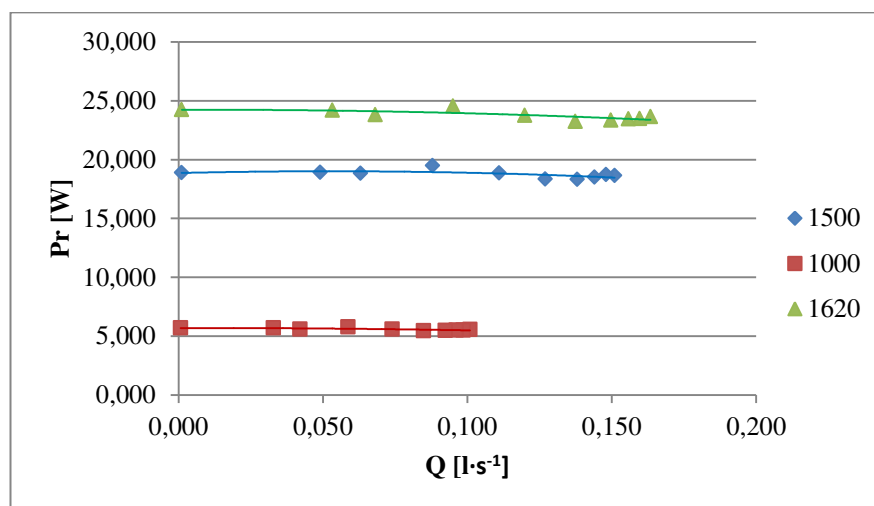
CHARAKTERISTIKY PRAVÉHO KOLA

Na grafu 9 jsou znázorněny průběhy měrných energií v závislosti na průtoku. Pravé kolo má při otáčkách 1500 min⁻¹ dopravní výšku přibližně 0,305 m, což je o 0,06 m nižší oproti návrhu. Avšak nesouhlasí otáčky, které byly navrženy 1000 min⁻¹. Bylo vypočítáno, že při 1620 min⁻¹ by pravé čerpadlo pracovalo jako v návrhovém bodě.

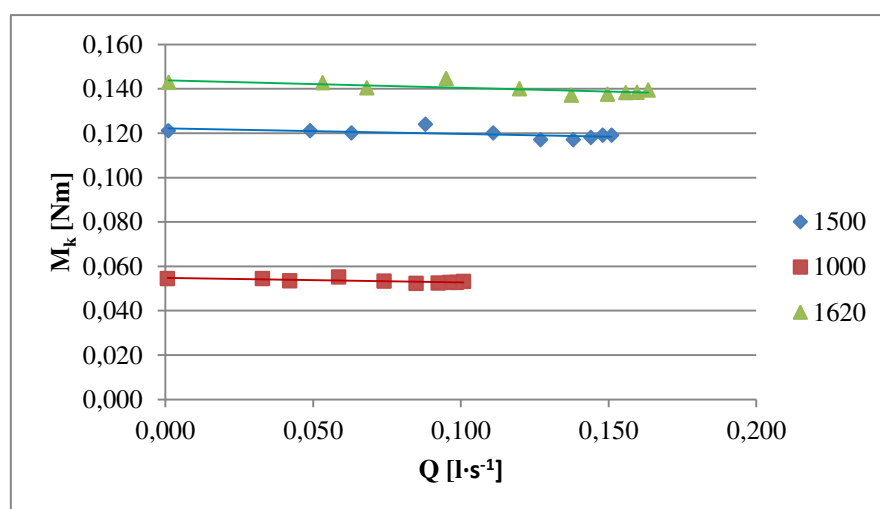
Hodnoty grafů 10 a 11 by měly klesat, ale jsou konstantní.



Graf 9: Závislost měrné energie na průtoku pravého čerpadla



Graf 10: Závislost příkonu na průtoku pravého čerpadla

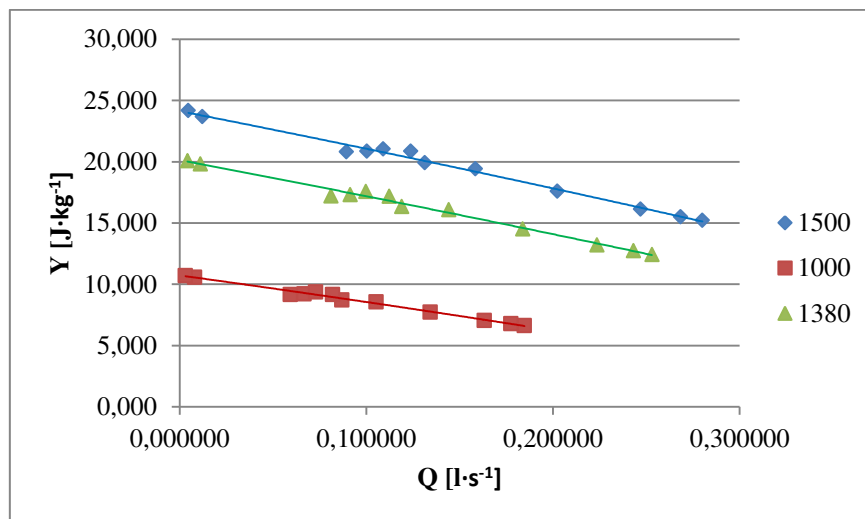


Graf 11: Závislost krouticího momentu na průtoku pravého čerpadla

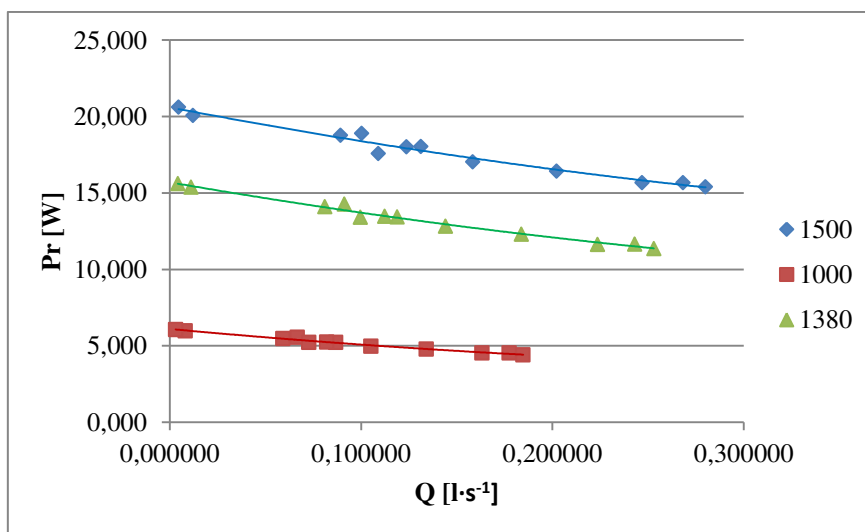
CHARAKTERISTIKY LEVÉHO KOLA

Návrhový bod levého čerpadla taktéž nebyl splněn, neboť při otáčkách 1000 min^{-1} při a průtoku $0,15 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ nedosahuje čerpadlo dopravní výšky 1,5 m, nýbrž jen polovinu této hodnoty. Parametry návrhu byly splněny při otáčkách 1380 min^{-1} .

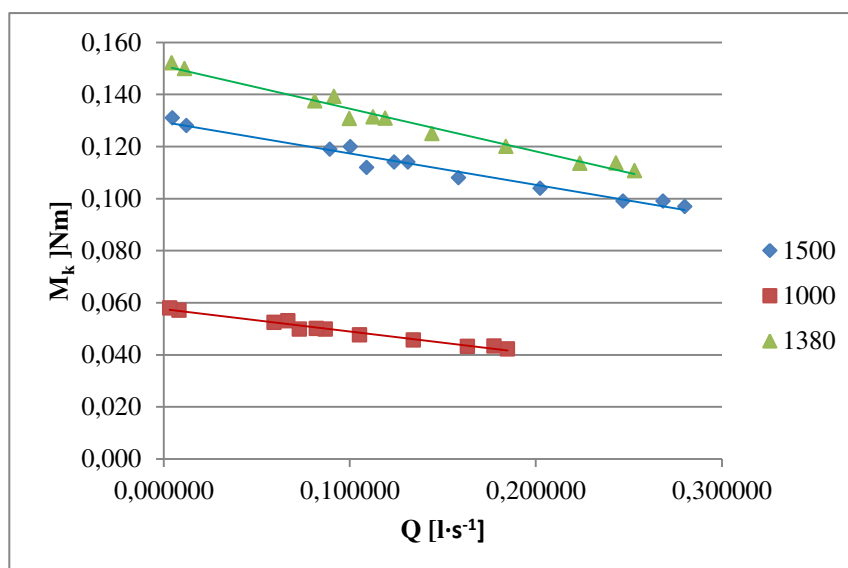
Charakteristiky závislosti příkonů a krouticího momentu jsou přijatelnější než v případě pravého čerpadla.



Graf 12: Závislost měrné energie na průtoku levého čerpadla



Graf 13: Závislost příkonu na průtoku levého čerpadla



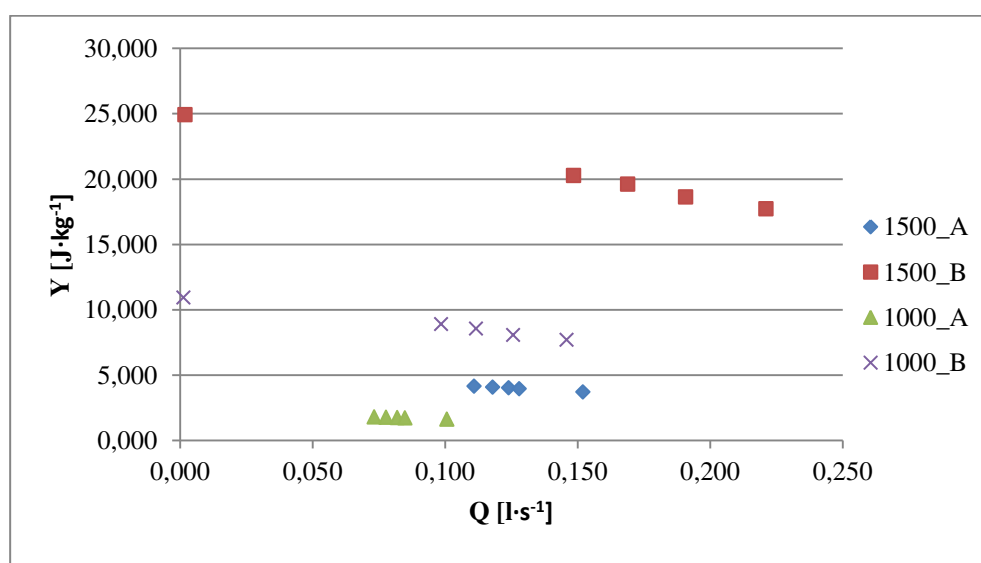
Graf 14: Závislost kroučicího momentu na průtoku levého čerpadla

Obě vířivá čerpadla tedy nesplnila požadované parametry, což mohly zapříčinit vznikající ztráty jak vlivem netěsnosti modelu, tak také vlivem nepoužití ucpávek, jejichž absence způsobila mísení pracovní kapaliny obou čerpadel.

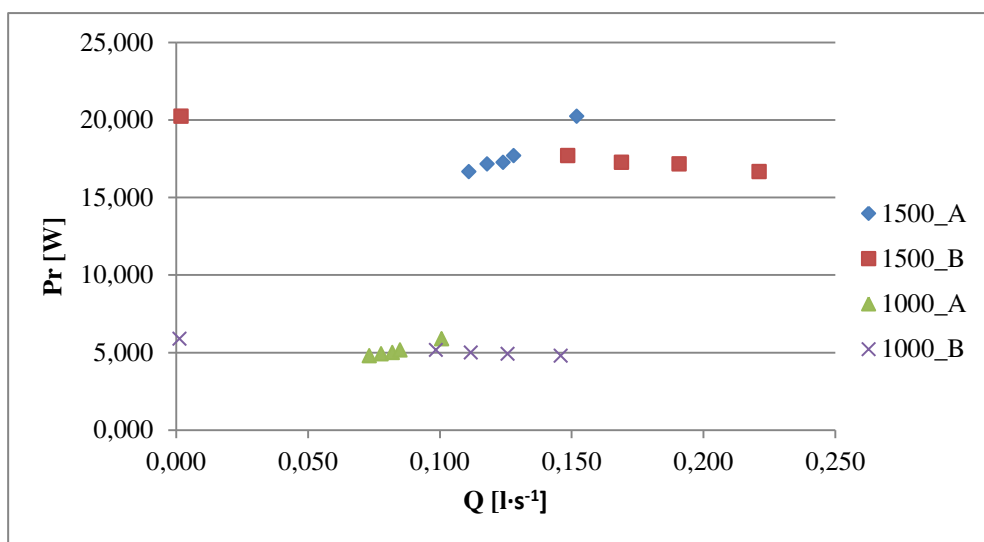
CELKOVÁ CHARAKTERISTIKA OBOU ČERPADEL

První varianta:

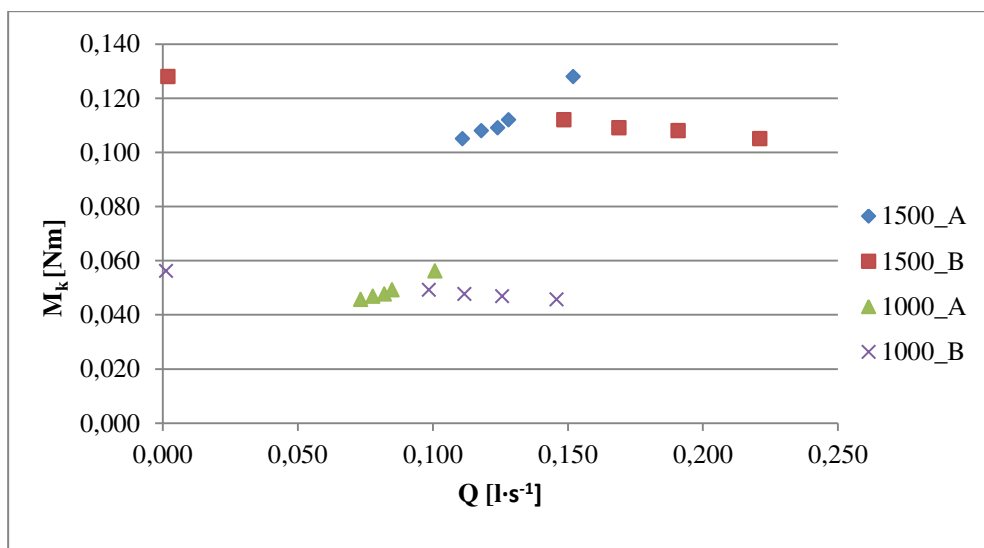
Pravé čerpadlo má plně otevřený redukční ventil, zatímco levému čerpadlu je průtok snižován. Při společném chodu dosahuje levé čerpadlo při 1500 min⁻¹ dopravní výšky až 2 m, zatímco pravé čerpadlo při těchto otáčkách svůj návrhový bod přibližně splňuje. Pro 1000 min⁻¹ byly hodnoty měrných energií čerpadel asi o dvě třetiny nižší, než bylo navrženo. Křivky závislosti příkonu a kroučicího momentu pravého čerpadla nesplňují předpoklady, kdežto křivky levého čerpadla jsou vyhovující.



Graf 15: Závislost měrné energie na průtoku při společném chodu čerpadel



Graf 16: Závislost příkonu na průtoku při společném chodu čerpadel

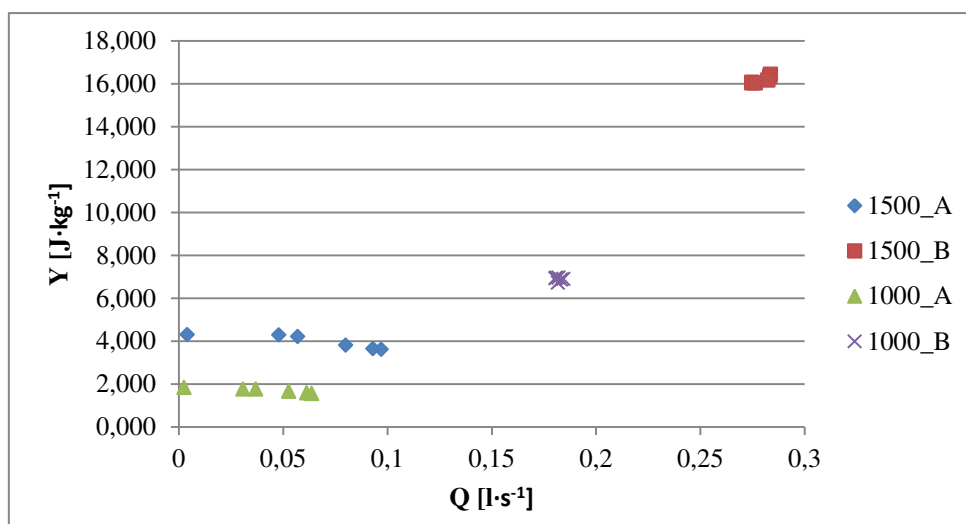


Graf 17: Závislost krouticího momentu na průtoku při společném chodu čerpadel

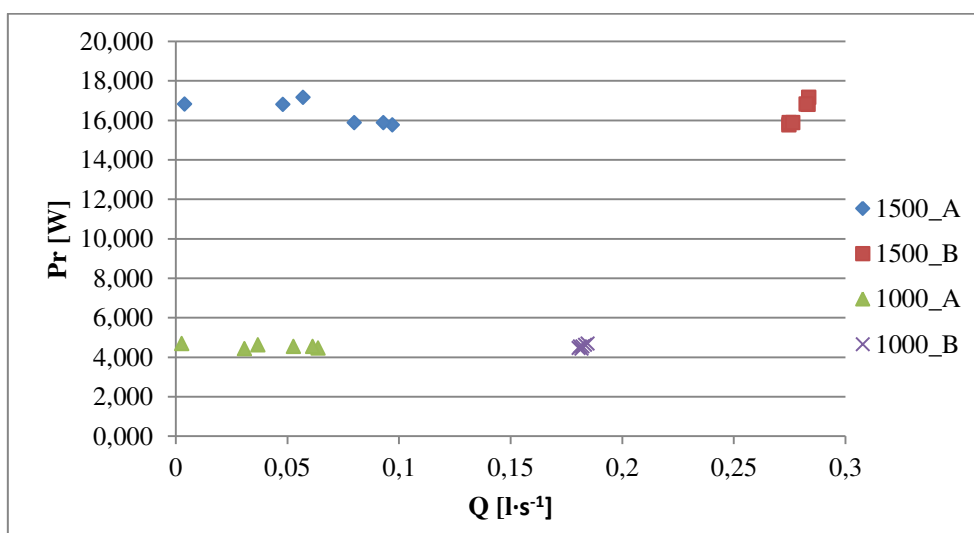
Druhá varianta:

Plně otevřený ventil má tentokrát levé čerpadlo, u pravého dochází k redukování průtoku. Při otáčkách 1500 min^{-1} je dopravní výška i průtok levého čerpadla mnohem vyšší než navrhovaná, při 1000 min^{-1} zase nižší. Dopravní výška pravého čerpadla je splněna jen při 1500 min^{-1} a $0,1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$.

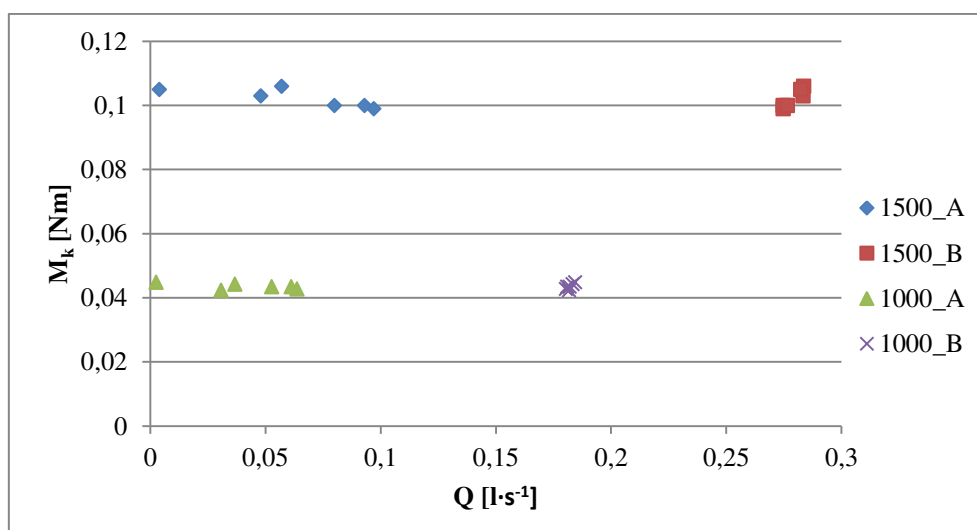
Hodnoty závislostí krouticího momentu a příkonu se v případě levého kola příliš neliší a u pravého kola jsou přijatelné.



Graf 18: Závislost měrné energie na průtoku při společném chodu čerpadel



Graf 19: Závislost příkonu na průtoku při společném chodu čerpadel



Graf 20: Závislost krouticího momentu na průtoku při společném chodu čerpadel

V první variantě společného chodu čerpadel bylo zjištěno, že levé čerpadlo, které bylo navrženo na vyšší parametry, ovlivňuje při snižování vlastního průtoku i průtok pravého čerpadla, k čemuž by nedocházelo, kdyby byly použity ucpávky. Charakteristiky čerpadel jsou tedy silně ovlivněné ztrátami – mísení pracovní tekutiny a netěsnosti modelu.

Hodnoty nejistot měření jsou vloženy do přílohy.

7.7 SROVNÁNÍ EXPERIMENTU S CFD VÝPOČTEM

CFD výpočet byl řešen při otáčkách 1000 min^{-1} , zatímco experiment byl měřen při 1500 min^{-1} . Avšak podle afinních vztahů mohly být charakteristiky obou čerpadel přepočítány na hodnotu 1000 min^{-1} .

Bylo vyhodnoceno, že levé kolo má při těchto otáčkách v experimentu dopravní výšku 0,75 m, zatímco v CFD výpočtu 1,1 m. Dopravní výška pravého kola byla stanovena podle CFD výpočtu na hodnotu 0,1 m, což souhlasí s naměřenou hodnotou z experimentu. V tomto případě se jednalo o porovnání se samostatně změřenými čerpadly.

Výsledky měření společného chodu neodpovídají CFD výpočtům.

ZÁVĚR

Rešeršní část diplomové práce vypovídá o totálních srdečních náhradách a podporách, které se poslední roky používají nebo zkoumají. Poté byl využit model vířivého čerpadla Ing. Pavla Šmída. Ten byl experimentálně změřen a byly vyhodnoceny charakteristiky. Na základě nich bylo navrženo pravého oběžného kolo vířivého čerpadla, levé kolo bylo shledáno jako vyhovující.

Byl tedy řešen jak hydraulický návrh, tak také konstrukční návrh, jenž se týkal uložení motoru a oběžných kol. Ty byly zapotřebí mechanicky spojit s rotorem motoru, aby obě tyto součásti vykonávaly rotující pohyb. Kvůli rozměrovému omezení byl použit v koncepci diskový motor Ing. Rostislava Huzlíka, Ph.D. Motor nebyl v rámci diplomové práce využit z důvodu jeho omezené funkčnosti, proto by bylo vhodné pro další vývoj využít motor od některých firem, o kterých je zmíněno na konci kapitoly o konstrukčním řešení.

Dále byl řešen CFD výpočet a zároveň i experimentální řešení synchronních vířivých čerpadel. Výsledky laboratorního měření nebyly totožné s výsledky CFD výpočtů, což mohlo souviset s tím, že CFD programy nemusí vždy zachytit přesné řešení proudění kapaliny jako v reálném experimentu. Druhý fakt je ten, že v CFD výpočtech nebylo počítáno se ztrátami způsobené netěsností modelu oproti měření experimentu.

Návrhové parametry tedy nebyly splněny ani v experimentu, ani v CFD výpočtu. Asi největším podílem tohoto nezdaru byla právě absence ucpávek, bez kterých se kapaliny obou čerpadel vzájemně mísily, což platilo jak pro laboratorní měření, tak pro CFD výpočet.

Do budoucna by bylo vhodné zajistit lepší motor do koncepce synchronních vířivých čerpadel a zamyslet se nad případnými možnými ucpávkami, které by jistě zajistily kvalitnější experimentální měření i CFD výpočet. Jedna z myšlenek byla využít magnetické ucpávky, ale ty jsou ještě ve stádiu výzkumu.

V poslední řadě je důležité zhodnotit koncepci z hlediska smykových napětí. V CFD výpočtu byla stanovena hodnota 297 Pa, což podle výzkumu nezpůsobí hemolýzu krve, ale při cyklickém zatěžování erytrocyty mohou pravděpodobně zanikat.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ČÁPOVÁ, L. *Umělé srdce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 53 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. František Pochylý, CSc.
- [2] VARCHOLA, Michal. *Špeciálne hydrodynamické čerpadlá*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2017, 219 stran : ilustrace. ISBN 978-80-227-4711-0.
- [3] DUBOVÝ, Ľuboš. *Studie membránového čerpadla s lineárním motorem*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2010.
- [4] MELICHAR, Jan. *Hydraulické a pneumatické stroje: část čerpadla*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04383-7.
- [5] BRADA, Karel a Jaroslav BLÁHA. *Hydrodynamická čerpadla*. 2. přeprac. vyd. Praha: Čes. vys. učení techn, 1992. ISBN 8001008029.
- [6] VARCHOLA, Michal. *Hydrostatické čerpadlá*. Bratislava: Vysoká škola technická, 1988.
- [7] STRÝČEK, Oldrich. *Hydrodynamické čerpadlá*. Bratislava: Slovenská vysoká škola technická, 1988.
- [8] FOX, Carson S., Kelli L. MCKENNA, Paul E. ALLAIRE, Robert M. MENTZER, Amy L. THROCKMORTON a Robert M Jr MENTZER. *Total Artificial Hearts-Past, Current, and Future*. *Journal of Cardiac Surgery* [online]. 2015, **30**(11), 856-864 [cit. 2018-03-16]. DOI: 10.1111/jocs.12644. ISSN 08860440. Dostupný z <http://web.b.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=0&sid=3fa5b5dc-2920-4293-a653-161e9bade804%40sessionmgr120>
- [9] *Syncardia temporary total artificial heart* [online]. syncardia.com, [citace 2018-03-17]. Dostupný z <https://syncardia.com/clinicians/home/>
- [10] KARIMOV, J.H., N. MOAZAMI, M. KOBAYASHI et al. *First report of 90-day support of 2 calves with a continuous-flow total artificial heart*. *The journal of thoracic and cardiovascular surgery* [online]. 2015, **150**(3), 687-693, [citace 2018-03-17]. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2015.06.23. PMID 26173607. Dostupný z <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26173607>
- [11] *Carmat heart. Technology. Prosthesis*. [online]. carmatsa.com, [citace 2018-03-18]. Dostupný z <https://www.carmatsa.com/en/carmat-heart/technology/prosthesis>
- [12] *The BiVACOR device completely replaces the failing heart*. [online]. bivacor.com, [citace 2018-03-18]. Dostupný z <http://www.bivacor.com>
- [13] ABE, Yusuke, Takashi ISOYAMA, Itsuro SAITO, et al. *Animal Experiments of the Helical Flow Total Artificial Heart*. *Artificial Organs* [online]. 2015, **39**(8), 670-680 [cit. 2018-03-18]. DOI: 10.1111/aor.12543. ISSN 0160564X. Dostupné z <http://web.a.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=0&sid=56252979-d49d-4f10-8ce7-252aafbd43ad%40sessionmgr4009>

- [14] WOTKE, Jiri, Pavel HOMOLKA, Jaromír VASKU, et al. *Histopathology Image Analysis in Two Long-Term Animal Experiments with Helical Flow Total Artificial Heart. Artificial Organs* [online]. 2016, **40**(12), 1137-1145 [cit. 2018-03-18]. DOI: 10.1111/aor.12689. ISSN 0160564X. Dostupné z <http://web.a.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=0&sid=3a544ff8-3597-4a13-a7ef-ab9287d3488c%40sessionmgr4006>
- [15] *The Jarvik 2000*. [online]. jarvikheart.com, [citace 2018-03-18]. Dostupný z <https://www.jarvikheart.com/products/the-jarvik-2000/>
- [16] *Product and Technology Information*. [online]. thoratec.com, [citace 2018-03-19]. Dostupný z <http://www.thoratec.com/medical-professionals/vad-product-information/index.aspx>
- [17] *Thoratec HeartMate II LVAD* [online]. omnimedics.cz, [citace 2018-03-19]. Dostupný z <http://www.omnimedics.cz/produkty/thoratec-heartmate>
- [18] Morshuis, Michiel, Aly El-Banayosy, Latif Arusoglu, et al. *European experience od DuraHeart magnetically levitated centrifugal left ventricular assist system. European Jornal of Cardio-Thoracic Surgery* [online]. 2009, **35**(8), 1020–1028, [citace 2018-03-20]. DOI: 10.1016/j.ejcts.2008.12.0033. ISSN 1873734X. Dostupný z <https://academic.oup.com/ejcts/article/35/6/1020/473475>
- [19] *Products and Technology* [online]. heartware.com, [citace 2018-03-20]. Dostupný z <https://www.heartware.com/products-technology>
- [20] *Products* [online]. berlinheart.de, [citace 2018-03-24]. Dostupný z <http://www.berlinheart.de/index.php/mp/content/products>
- [21] *HeartAssist5* [online]. realiantheart.com, [citace 2018-03-27]. Dostupný z <http://reliantheart.com/new-heart-assist-5/the-next-generation-lvad/>
- [22] *Thoratec CentriMag* [online]. omnimedics.cz, [citace 2018-03-27]. Dostupný z <http://www.omnimedics.cz/produkty/thoratec-centrimag>
- [23] *Thoratec PediVAS* [online]. omnimedics.cz, [citace 2018-03-27]. Dostupný z <http://www.omnimedics.cz/produkty/thoratec-pedivas>
- [24] *Abbott HeartMate 3 LVAS* [online]. omnimedics.cz, [citace 2018-03-27]. Dostupný z <http://www.omnimedics.cz/produkty/abbott-heartmate-3-lvas>
- [25] VYSLOUŽIL, Tomáš. *Energetické stroje*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2014. ISBN 978-80-7414-743-2.
- [26] MACHARA, Radek. *Čerpadla pro podporu a náhradu srdce*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015.
- [27] HABÁN, Vladimír. *Přednášky a cvičení z předmětu Experimentální metody*. Vysoké učení technické v Brně, 2016.
- [28] ŠMÍD, Pavel. *Optimalizace vířivého čerpadla*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012.

- [29] HABÁN, Vladimír. *Přednášky z předmětu Potrubí technika*. Vysoké učení technické v Brně, 2017.
- [30] JAVORKA, Kamil. *Lékařská fyziologie: učebnice pro lékařské fakulty*. Martin: Osveta, 2001. Vysokoškolské učebnice. ISBN 80-8063-023-2.
- [31] FEJFAR, Zdeněk. *Srdce v labyrintu světa*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Praha: Makropulos, 1997. ISBN 80-86003-03-5.
- [32] LACINA, David. *Elektrický stroj s axiálním magnetickým tokem*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015, 55 listů : foto, grafy, tabulky.
- [33] HALUZA, Miloslav. *Přednášky z předmětu Tekutinové stroje*. Vysoké učení technické v Brně, 2017
- [34] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. (Richard Gordon) BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTUM, 2010, xxv, 1159 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [35] *Plasty – mechanické vlastnosti* [online]. e-konstrukter.cz, [citace 2018-05-16]. Dostupný z <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/plasty-mechanicke-vlastnosti>
- [36] LEINVEBER, Jan, Jaroslav ŘASA a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. 3., dopl. vyd., dot. Praha: Scientia, 1999. ISBN 80-7183-164-6.
- [37] IDEL'ČIK, Isaak Jevsejevič. *Spravočnik po gidravličeskim soprotivlenijam*. Moskva: Izdatel'stvo Mašinostrojenije, 1975.
- [38] RUDOLF, Pavel. *Přednášky a cvičení z předmětu Výpočtové modelování proudění*. Vysoké učení technické v Brně, 2017
- [39] *Vývoj úmrtnosti v České republice – 2016-2016. Mezinárodní srovnání* [online]. czso.cz, [citace 2018-05-16]. Dostupný z <https://www.czso.cz/documents/10180/45964394/13012517a06.pdf/126d7146-3d99-41c9-9f7e-cc9f8e82321e?version=1.2>
- [40] LEVERETT, L. B., J.D. HELLUMS, C.P. ALFREY et al. *Red blood cell damage by shear stress*. *Biophysical Journal*. [online]. 1972, **12**(3), 257–273, [citace 2018-05-23]. DOI:10.1016/S0006-3495(72)86085-5. Dostupné z <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1484094/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ABS	[-]	Plastový materiál: Akrylonitril-Butadien-Styren
b	[m]	Šířka pera
BiVAD	[-]	Srdeční podpora pro obě komory (z angliského BiVentricular Assist Device)
c_2	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost na výstupu
CFTAH	[-]	Totální srdeční náhrada s nepřetržitým prouděním (z anglického Continuous Flow TAH)
D, d	[m]	Průměr
d_{hrdel}	[m]	Průměr hřídle
D_{roztec}	[m]	Průměr roztečné kružnice kolíků
DN	[mm]	Jmenovitý průměr (diameter nominal)
f	[Hz]	Frekvence
F_A	[N]	Axiální síla
F_R	[N]	Radiální síla
g	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Tíhové zrychlení
HFTAH	[-]	Totální srdeční náhrada se šroubovitým směrem proudu (z anglického Helical Flow Total Artificial Heart)
H, h	[m]	Dopravní výška
I	[A]	Elektrický proud
IKEM	[-]	Institut Klinické a Experimentální Medicíny
k-ε	[-]	Výpočetní model k-epsilon programu ANSYS pro zavířené prostředí
l	[m]	Délka lopatky
l_K	[m]	Délka kolíku
l_p	[m]	Délka pera
m	[kg]	Hmotnost
M_k	$[N \cdot m]$	Krouticí moment
n	$[s^{-1}]$	Otáčky
n_{jme}	$[s^{-1}]$	Jmenovité otáčky
p	[Pa], [mm·Hg], [bar]	Tlak
p_0	[Pa], [mm·Hg], [bar]	Základní hodnota tlaku
p_1, p_s	[Pa], [mm·Hg], [bar]	Tlak v místě nasání
p_2, p_v	[Pa], [mm·Hg], [bar]	Tlak v místě výtlaku

P	[W]	Výkon
p_D	[Pa], [mm·Hg], [bar]	Dovolený tlak
p_{max}	[Pa], [mm·Hg], [bar]	Maximální tlak v místě statoru
p_{min}	[Pa], [mm·Hg], [bar]	Minimální tlak v místě statoru
Pr	[W]	Příkon
PVC	[-]	Polyvinylchlorid
Q	[m ³ ·s ⁻¹], [kg·s ⁻¹]	Průtok
RSM	[-]	Výpočetní model Reynolds Stress Model programu ANSYS pro silně zavířená prostředí
S	[m ²]	Obsah průřezu potrubí
t	[m]	Výška drážky v hřídeli
t_1	[m]	Výška drážky v náboji
TAH	[-]	Totální srdeční náhrada (z anglického Total Artificial Heart)
TH	[-]	Tenzometrická hřídel
U	[V]	Elektrické napětí
u_{BMk}	[-]	Nejistota měření krouticího momentu
u_{Bn}	[-]	Nejistota měření otáček
u_{Bp}	[-]	Nejistota měření tlaku
u_{BPr}	[-]	Nejistota měření příkonu
u_{BQ}	[-]	Nejistota měření průtoku
u_{BY}	[-]	Nejistota měření měrné energie
V	[m ³]	Objem
v.č.	[-]	Výrobní číslo
Y	[J·kg ⁻¹]	Měrná energie čerpadla
y+	[-]	Stěnová funkce
z	[m]	Obecné označení dopravní výšky
η	[%], [-]	Účinnost
π	[-]	Ludolfovo číslo
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota vody

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Rozdělení čerpadel [2], [3], [5], [6]	16
Obrázek 2: Radiální čerpadlo [25]	17
Obrázek 3: Diagonální čerpadlo [25]	18
Obrázek 4: Axiální čerpadlo [25]	18
Obrázek 5: Schéma vířivého čerpadla [2]	19
Obrázek 6: Typy oběžných kol vířivého čerpadla – vlevo uzavřené, vpravo otevřené [2]	19
Obrázek 7: Typické proudění [2]	19
Obrázek 8: Pracovní proces [2]	20
Obrázek 9: Membránové čerpadlo [6](upraveno)	21
Obrázek 10: Peristaltické čerpadlo [26]	22
Obrázek 11: SynCardia TAH [9]	23
Obrázek 12: SynCardia [8]	24
Obrázek 13: AbioCor [8]	24
Obrázek 14: CFTAH [10]	25
Obrázek 15: Carmat TAH [8]	26
Obrázek 16: BiVACOR [12]	26
Obrázek 17: HFTAH [14]	27
Obrázek 18: Jarvik 2000 Flow Maker [15]	28
Obrázek 19: HeartMate II [16]	29
Obrázek 20: HeartWare [19]	29
Obrázek 21: Membránové čerpadlo EXCOR [20]	30
Obrázek 22: Axiální čerpadlo INCOR [20]	30
Obrázek 23: Heart Assist 5 [21] (upraveno)	31
Obrázek 24: Thoratec CentriMag (Thoratec PediVAS) [22]	31
Obrázek 25: HeartMate III [24]	32
Obrázek 26: Schéma počátečního experimentu	34
Obrázek 27: Sestavení experimentu v Hydraulické laboratoři	34
Obrázek 28: První varianta směru otáčení lopatek ve vířivém čerpadle	37
Obrázek 29: Druhá varianta směru otáčení lopatek ve vířivém čerpadle	38
Obrázek 30: Vstupní a výstupní tlaky srdce ([1], [30], [31])	41
Obrázek 31: Výkres satoru (vlevo) a rotoru (vpravo) [32]	44
Obrázek 32: Umístění permanentních magnetů rotoru [32]	44
Obrázek 33: Průřez konstrukcí diskového motoru [32]	44
Obrázek 34: Výkres oběžného kola levého čerpadla	45
Obrázek 35: Výkres oběžného kola pravého čerpadla	45
Obrázek 36: Výkres první varianty upnutí oběžných kol	46
Obrázek 37: Výkres druhé varianty upnutí oběžných kol	47
Obrázek 38: Výkres třetí varianty upnutí oběžných kol	48
Obrázek 39: Výkres konečného návrhu uchycení oběžných kol	49
Obrázek 40: Krytování konečného návrhu	50
Obrázek 41: Model ideového návrhu umělého srdce	52
Obrázek 42: Výkres sestavy ideového návrhu v řezu	53
Obrázek 43: Okrajové podmínky vstupu a výstupu	55
Obrázek 44: Proudnice synchronních vířivých čerpadel	56
Obrázek 45: Vykreslení vektorů rychlosti v mezilopatkovém prostoru	56
Obrázek 46: Lokální vír mezi lopatkami	57
Obrázek 47: Proudění kapaliny v prostoru spáry	57
Obrázek 48: Zobrazení vektorů rychlosti v mezilopatkovém prostoru	58

Obrázek 49: Lokální vír mezi lopatkami	58
Obrázek 50: Proudění kapaliny v prostoru spáry	59
Obrázek 51: Tlakové rozložení levého statoru	59
Obrázek 52: Tlakové rozložení pravého statoru	60
Obrázek 53: Tabulka vypočítaných veličin programem CFX	60
Obrázek 54: Schéma závěrečného experimentu	62
Obrázek 55: Sestavení experimentu v Hydraulické laboratoři	62

SEZNAM POUŽITÝCH GRAFŮ

Graf 1: Závislost měrné energie na průtoku při měřených otáčkách	37
Graf 2: Závislost příkonu na průtoku při měřených otáčkách	37
Graf 3: Závislost krouticího momentu na průtoku při měřených otáčkách	38
Graf 4: Závislost měrné energie na průtoku při daných měřených otáčkách	38
Graf 5: Závislost příkonu na průtoku při měřených otáčkách	39
Graf 6: Závislost krouticího momentu na průtoku při měřených otáčkách	39
Graf 7: Naměřené Y-Q a η -Q charakteristiky při otáčkách 1300 min^{-1} Ing. Pavlem Šmídem	40
Graf 8: Závislosti měrné energie na průtoku při $n_{jme} = 1000 \text{ min}^{-1}$	41
Graf 9: Závislost měrné energie na průtoku pravého čerpadla	65
Graf 10: Závislost příkonu na průtoku pravého čerpadla	65
Graf 11: Závislost krouticího momentu na průtoku pravého čerpadla	65
Graf 12: Závislost měrné energie na průtoku levého čerpadla	66
Graf 13: Závislost příkonu na průtoku levého čerpadla	66
Graf 14: Závislost krouticího momentu na průtoku levého čerpadla	67
Graf 15: Závislost měrné energie na průtoku při společném chodu čerpadel	67
Graf 16: Závislost příkonu na průtoku při společném chodu čerpadel	68
Graf 17: Závislost krouticího momentu na průtoku při společném chodu čerpadel	68
Graf 18: Závislost měrné energie na průtoku při společném chodu čerpadel	69
Graf 19: Závislost příkonu na průtoku při společném chodu čerpadel	69
Graf 20: Závislost krouticího momentu na průtoku při společném chodu čerpadel	69

SEZNAM PŘÍLOH

CD

Počáteční experiment - naměřená data, výpočty potřebných veličin a nejistot měření

První varianta

	Naměřené hodnoty					Vypočítané hodnoty			Nejistoty měření							
	Q [J/s]	p1 [kPa]	p2 [kPa]	U [V]	n [min-1]	I [A]	Y [J/kg]	Pr [W]	Mk [Nm]	uBp1 [-]	uBp2 [-]	uQ [-]	un [-]	uMk [-]	uBY [-]	uPr [-]
bod01	0,151661	100,8404	101,3555	4,709017	529	2,48	2,381877	11,67836	0,210819	252,1011	253,3887	6,45E-07	0,017633	0,004	0,357453	0,222815
bod02	0,144514	100,8955	101,6842	4,708858	524	2,5	2,65559	11,77215	0,21454	252,2387	254,2106	6,21E-07	0,017467	0,004	0,358131	0,220752
bod03	0,132351	100,984	102,0582	4,708779	528	2,54	2,941017	11,9603	0,216318	252,46	255,1454	5,64E-07	0,0176	0,004	0,358946	0,222458
bod04	0,119266	100,9092	102,223	4,710689	530	2,5	3,180668	11,77672	0,212194	252,2729	255,5575	5,06E-07	0,017667	0,004	0,359104	0,223252
bod05	0,111004	101,4072	102,8568	4,710666	530	2,52	3,316505	11,87088	0,21389	253,5179	257,142	4,71E-07	0,017667	0,004	0,361105	0,223272
bod06	0,098369	101,4786	103,348	4,710534	530	2,56	3,736181	12,05897	0,217279	253,6965	258,3699	4,18E-07	0,017667	0,004	0,362104	0,223312
bod07	0,084028	101,5522	103,484	4,7106	515	2,56	3,798662	12,05914	0,223611	253,8805	258,7101	3,67E-07	0,017167	0,004	0,362474	0,217067
bod08	0,069482	101,6099	103,9966	4,710257	520	2,62	4,253574	12,34087	0,226635	254,0248	259,9916	3,01E-07	0,017333	0,004	0,36349	0,219211
bod09	0,053511	101,6617	104,1545	4,710311	515	2,61	4,359701	12,29391	0,227964	254,1542	260,3863	2,34E-07	0,017167	0,004	0,363862	0,21712
bod10	0,039503	101,6713	104,342	4,710258	510	2,63	4,537581	12,38798	0,231961	254,1782	260,8551	1,74E-07	0,017	0,004	0,364214	0,21506
bod11	0,000846	101,7336	105,2364	4,709771	510	2,69	5,369677	12,66928	0,237228	254,334	263,0911	3,73E-09	0,017	0,004	0,365927	0,215126
bod30	0,401261	96,95068	109,5953	9,544476	1343,333	4,64	14,51148	44,28637	0,314826	242,3767	273,9883	6,72E-07	0,044778	0,004	0,365828	0,569623
bod31	0,360421	97,83076	113,147	9,543018	1343,333	4,87	17,18307	46,4745	0,330381	244,5769	282,8675	6,04E-07	0,044778	0,004	0,373953	0,57032
bod32	0,316723	98,67574	115,8328	9,542199	1343,333	5,02	19,02388	47,90184	0,340528	246,6894	289,582	5,3E-07	0,044778	0,004	0,380419	0,570792
bod33	0,283613	99,25228	118,2853	9,54109	1321,667	5,19	20,89991	49,51826	0,35779	248,1307	295,7134	4,83E-07	0,044056	0,004	0,38603	0,562407
bod34	0,241747	99,88555	121,3943	9,53933	1321,667	5,42	23,37557	51,70317	0,373576	249,7139	303,4857	4,12E-07	0,044056	0,004	0,393017	0,563193
bod35	0,196161	100,4515	124,1545	9,537766	1321,667	5,6	25,66483	53,41149	0,38592	251,1288	310,6238	3,34E-07	0,044056	0,004	0,399442	0,563831
bod36	0,159831	100,8208	126,6736	9,536607	1321,667	5,78	27,71965	55,12159	0,398276	252,052	316,684	2,72E-07	0,044056	0,004	0,404746	0,564489
bod37	0,119939	101,1255	128,6352	9,535487	1301,667	5,95	29,37653	56,73615	0,41624	252,8138	321,588	2,07E-07	0,043389	0,004	0,409065	0,556924
bod38	0,081681	101,341	130,5388	9,534481	1301,667	6,1	31,06465	58,16034	0,426689	253,3525	326,347	1,41E-07	0,043389	0,004	0,413146	0,557511
bod39	0,049043	101,4415	131,9599	9,533836	1301,667	6,23	32,38524	59,3958	0,435753	253,6037	329,8997	8,48E-08	0,043389	0,004	0,416111	0,558032
bod50	0,297592	98,63749	105,1576	7,482603	1000	3,47	8,386929	25,96463	0,247951	246,5937	262,8939	6,7E-07	0,033333	0,004	0,360465	0,422086
bod51	0,273045	99,5011	106,9831	7,482031	1000	3,55	9,348867	26,56121	0,253648	248,7528	267,4578	6,14E-07	0,033333	0,004	0,365269	0,422234
bod52	0,23863	100,0178	108,7052	7,481451	1000	3,65	10,55429	27,3073	0,260773	250,0444	271,763	5,37E-07	0,033333	0,004	0,369301	0,422425
bod53	0,201977	100,4774	110,8635	7,480372	1000	3,8	12,25295	28,42541	0,271451	251,1935	277,1588	4,54E-07	0,033333	0,004	0,374056	0,42272
bod54	0,165719	100,8794	112,8479	7,47945	1010	4,02	13,83542	30,06739	0,284288	252,1984	282,1199	3,69E-07	0,033667	0,004	0,378414	0,42732
bod55	0,133866	101,1544	114,4438	7,478556	1000	4,09	15,15621	30,58729	0,292096	252,8861	286,1095	3,01E-07	0,033333	0,004	0,381851	0,423323
bod56	0,099139	101,392	115,5116	7,478333	990	4,16	15,98647	31,10987	0,300087	253,48	288,7791	2,25E-07	0,033	0,004	0,384247	0,419332
bod57	0,071213	101,5257	116,4995	7,477826	980	4,22	16,84061	31,55643	0,307501	253,8143	291,2487	1,63E-07	0,032667	0,004	0,386326	0,415325
bod58	0,046667	101,5738	117,0414	7,477696	980	4,26	17,33438	31,85499	0,31041	253,9346	292,6034	1,07E-07	0,032667	0,004	0,387427	0,415416
bod59	0,000878	101,6241	118,0473	7,477127	970	4,36	18,29005	32,60027	0,320947	254,0603	295,1183	2,04E-09	0,032333	0,004	0,389412	0,411511
bod60	0,295677	98,95521	105,3586	7,483049	1010	3,45	8,270199	25,81652	0,244096	247,388	263,3964	6,59E-07	0,033667	0,004	0,361374	0,426207
bod70	0,219338	99,97126	102,8557	5,995636	756,6667	2,83	4,751261	16,96765	0,214142	249,9281	257,1392	6,52E-07	0,025222	0,004	0,358604	0,318763
bod71	0,196887	100,2591	103,852	5,995229	746,6667	2,88	5,459773	17,26626	0,220829	250,6478	259,6301	5,93E-07	0,024889	0,004	0,360888	0,314664
bod72	0,172688	100,503	104,8212	5,994718	746,6667	2,94	6,185052	17,62447	0,22541	251,2576	262,0531	5,2E-07	0,024889	0,004	0,363053	0,314743
bod73	0,145602	100,7726	106,1825	5,994009	746,6667	3,07	7,276678	18,40161	0,235349	251,9316	265,4562	4,39E-07	0,024889	0,004	0,365977	0,314921
bod74	0,103664	101,0811	107,6354	5,993378	740	3,18	8,421208	19,05894	0,245952	252,7026	269,0885	3,15E-07	0,024667	0,004	0,369145	0,312306
bod75	0,077629	101,2194	108,4147	5,993012	740	3,23	9,062132	19,35743	0,249804	253,0485	271,0367	2,36E-07	0,024667	0,004	0,370803	0,312379
bod76	0,000835	101,413	109,9437	5,992268	730	3,35	10,39749	20,0741	0,262602	253,5325	274,8591	2,57E-09	0,024333	0,004	0,373934	0,308406

Druhá varianta

	Naměřené hodnoty						Vypočítané hodnoty			Nejistoty měření						
	Q [l/s]	p1 [kPa]	p2 [kPa]	U [V]	n [min-1]	I [A]	Y [J/kg]	Pr [W]	Mk [Nm]	uBp1 [-]	uBp2 [-]	uQ [-]	un [-]	uMk [-]	uBY [-]	uPr [-]
bod100	0,262348	98,04651	102,8252	7,380776	980	3,056	6,645567	22,55565	0,219793	245,1163	257,0631	6,02E-07	0,032667	0,004	0,355208	0,412973
bod101	0,244458	98,28122	104,3652	7,379893	1010	3,212	7,950827	23,70421	0,224124	245,703	260,913	5,45E-07	0,033667	0,004	0,358401	0,425716
bod102	0,216976	98,63572	105,183	7,379853	980	3,219	8,414145	23,75575	0,231487	246,5893	262,9576	4,98E-07	0,032667	0,004	0,360496	0,413242
bod103	0,200525	98,82916	106,2472	7,379337	980	3,262	9,284874	24,0714	0,234563	247,0729	265,618	4,6E-07	0,032667	0,004	0,362768	0,413315
bod104	0,180743	99,0428	107,655	7,378549	990	3,381	10,47899	24,94687	0,240639	247,607	269,1374	4,11E-07	0,033	0,004	0,365713	0,417681
bod105	0,16147	99,22819	108,7435	7,378202	990	3,457	11,38217	25,50644	0,246036	248,0705	271,8588	3,67E-07	0,033	0,004	0,368032	0,417816
bod106	0,139366	99,41262	109,6559	7,377739	990	3,531	12,11013	26,0508	0,251287	248,5315	274,1398	3,17E-07	0,033	0,004	0,370029	0,417951
bod107	0,119291	99,54785	110,5496	7,377327	980	3,58	12,86857	26,41083	0,257359	248,8696	276,3739	2,74E-07	0,032667	0,004	0,371913	0,413886
bod108	0,100683	99,65575	111,717	7,376565	990	3,688	13,9281	27,20477	0,262418	249,1394	279,2925	2,29E-07	0,033	0,004	0,374266	0,418245
bod109	0,080321	99,74355	112,6676	7,376098	990	3,81	14,79085	28,10293	0,271082	249,3589	281,6689	1,83E-07	0,033	0,004	0,376188	0,418482
bod110	0,059615	99,8037	113,6692	7,375396	990	3,855	15,73233	28,43215	0,274258	249,5093	284,173	1,35E-07	0,033	0,004	0,378166	0,418571
bod111	0,000826	99,84391	114,6902	7,374953	980	3,943	16,71311	29,07944	0,283364	249,6098	286,7254	1,9E-09	0,032667	0,004	0,380153	0,414601
bod112	0,200171	98,56236	101,0091	5,995036	755	2,632	4,313591	15,77894	0,199579	246,4059	252,5228	5,97E-07	0,025167	0,004	0,352835	0,317824
bod113	0,181317	98,76966	101,6454	5,994891	755	2,635	4,742595	15,79654	0,199802	246,9242	254,1135	5,4E-07	0,025167	0,004	0,354332	0,317828
bod114	0,160814	98,96531	102,5077	5,994415	755	2,712	5,409192	16,25685	0,205624	247,4133	256,2692	4,79E-07	0,025167	0,004	0,356217	0,317921
bod115	0,140918	99,13665	103,449	5,993988	755	2,781	6,179202	16,66928	0,210841	247,8416	258,6225	4,2E-07	0,025167	0,004	0,358208	0,318006
bod116	0,121392	99,27387	103,979	5,993907	720	2,768	6,571997	16,59114	0,220053	248,1847	259,9476	3,79E-07	0,024	0,004	0,359402	0,303413
bod117	0,10258	100,5697	106,1812	5,993514	745	2,876	7,478435	17,23735	0,220952	251,4241	265,4531	3,1E-07	0,024833	0,004	0,365623	0,313963
bod118	0,082468	100,6648	106,9628	5,993129	745	2,924	8,164842	17,52391	0,224625	251,662	267,407	2,49E-07	0,024833	0,004	0,367206	0,314027
bod119	0,057418	100,7625	107,597	5,992948	735	2,954	8,701282	17,70317	0,230011	251,9063	268,9924	1,76E-07	0,0245	0,004	0,368529	0,309905
bod120	0,037287	100,7764	107,6209	5,993057	720	3,006	8,711303	18,01513	0,23894	251,941	269,0521	1,17E-07	0,024	0,004	0,368596	0,303738
bod121	0,000816	100,7786	107,9517	5,992748	720	2,919	9,039968	17,49283	0,232013	251,9465	269,8793	2,55E-09	0,024	0,004	0,369204	0,303615
bod122	0,141406	100,1801	100,43	4,711503	535	2,192	2,11678	10,32761	0,184345	250,4502	251,0751	5,95E-07	0,017833	0,004	0,354644	0,22505
bod123	0,124225	100,3094	101,0273	4,711135	540	2,233	2,584688	10,51997	0,186039	250,7736	252,5682	5,18E-07	0,018	0,004	0,355926	0,227171
bod124	0,109331	100,4049	101,5914	4,710911	565	2,294	3,053352	10,80683	0,182656	251,0122	253,9784	4,35E-07	0,018833	0,004	0,357092	0,237652
bod125	0,095213	100,4829	101,8891	4,710816	540	2,292	3,273038	10,79719	0,190942	251,2072	254,7227	3,97E-07	0,018	0,004	0,357757	0,227223
bod126	0,081607	100,4495	102,0862	4,71081	530	2,299	3,50355	10,83015	0,195138	251,1238	255,2156	3,46E-07	0,017667	0,004	0,358049	0,22306
bod127	0,065897	100,5423	102,6333	4,710499	540	2,352	3,957826	11,07909	0,195927	251,3557	256,5832	2,75E-07	0,018	0,004	0,359187	0,227277
bod128	0,050785	100,5752	102,9307	4,710378	530	2,359	4,222374	11,11178	0,200213	251,438	257,3269	2,16E-07	0,017667	0,004	0,359775	0,223116
bod129	0,002282	100,6369	103,8552	4,709603	565	2,536	5,085218	11,94355	0,201869	251,5921	259,6381	9,09E-09	0,018833	0,004	0,361539	0,237869
bod130	0,373138	96,4965	107,2265	9,444396	1350	4,094	12,5968	38,66536	0,27351	241,2413	268,0662	6,22E-07	0,045	0,004	0,360648	0,57075
bod131	0,351484	96,90581	108,506	9,443961	1350	4,117	13,46706	38,88079	0,275033	242,2645	271,2651	5,86E-07	0,045	0,004	0,36371	0,570809
bod132	0,322792	97,45543	110,7801	9,443058	1350	4,279	15,19152	40,40685	0,285828	243,6386	276,9503	5,38E-07	0,045	0,004	0,368872	0,571232
bod133	0,290735	97,99473	113,1004	9,441924	1350	4,41	16,97255	41,63889	0,294544	244,9868	282,7511	4,85E-07	0,045	0,004	0,374126	0,571586
bod134	0,259296	98,48571	115,1808	9,441147	1350	4,519	18,56198	42,66454	0,301799	246,2143	287,9521	4,32E-07	0,045	0,004	0,378867	0,571889
bod135	0,225202	98,9457	117,5254	9,440136	1350	4,666	20,44652	44,04768	0,311583	247,3642	293,8134	3,75E-07	0,045	0,004	0,384079	0,572308
bod136	0,194798	99,28843	119,7098	9,43871	1330	4,845	22,28823	45,73055	0,328351	248,2211	299,2746	3,3E-07	0,044333	0,004	0,388818	0,564567
bod137	0,157354	99,65501	121,7591	9,437701	1330	4,988	23,97096	47,07525	0,338007	249,1375	304,3978	2,66E-07	0,044333	0,004	0,393355	0,565009
bod138	0,124542	99,87099	123,4382	9,436848	1315	5,115	25,43402	48,26948	0,350535	249,6775	308,5954	2,13E-07	0,043833	0,004	0,396951	0,559222
bod139	0,098195	100,0022	124,9928	9,43585	1295	5,239	26,8575	49,43442	0,364539	250,0054	312,482	1,71E-07	0,043167	0,004	0,400185	0,551385
bod140	0,069797	100,097	126,9036	9,434278	1295	5,426	28,67346	51,19039	0,377488	250,2424	317,259	1,21E-07	0,043167	0,004	0,404072	0,552026
bod141	0,046585	100,1409	128,3477	9,433345	1295	5,572	30,07361	52,5626	0,387607	250,3523	320,8692	8,09E-08	0,043167	0,004	0,406981	0,552542
bod142	0,000818	100,1365	128,8662	9,432885	1315	5,617	30,59646	52,98452	0,384776	250,3413	322,1654	1,4E-09	0,043833	0,004	0,407997	0,560927

Závěrečný experiment - naměřená data, výpočty potřebných veličin a nejistot měření

Naměřená a vypočítaná data

Měřená charakteristika pravého čerpadla - v našem měření A čerpadlo									Vypočítané veličiny			Přepočít na 1000 min ⁻¹				Přepočít na 1620 min ⁻¹			
	p1A [kPa]	p2A [kPa]	p1B [kPa]	p2B [kPa]	QB [l/s]	QA [l/s]	Mk [Nm]	n [min ⁻¹]	YA [J/kg]	PrA[W]	ηA [%]	YA [J/kg]	PrA[W]	QA [l/s]	Mk [Nm]	YA [J/kg]	PrA[W]	QA [l/s]	Mk [Nm]
bod 3	101,603	102,614	101,893	123,953	0,001859	0,151	0,119	1497	3,047	18,655	2,46	1,360	5,561	0,100868	0,053101	3,568	23,642	0,163407	0,139358
bod 4	101,607	102,648	101,884	123,953	0,001859	0,148	0,119	1502	3,077	18,717	2,43	1,364	5,524	0,098535	0,052748	3,579	23,484	0,159627	0,138432
bod 5	101,627	102,698	101,889	123,827	0,001857	0,144	0,118	1497	3,108	18,498	2,41	1,387	5,514	0,096192	0,052655	3,639	23,443	0,155832	0,138187
bod 6	101,674	102,802	101,914	123,776	0,001856	0,138	0,117	1494	3,165	18,305	2,38	1,418	5,489	0,092369	0,052419	3,721	23,338	0,149639	0,137567
bod 7	101,756	103,026	101,961	123,828	0,001859	0,127	0,117	1497	3,306	18,342	2,29	1,475	5,467	0,084836	0,052209	3,872	23,244	0,137435	0,137016
bod 8	101,875	103,394	102,023	124,031	0,001860	0,111	0,120	1500	3,556	18,850	2,09	1,580	5,585	0,074000	0,053333	4,147	23,745	0,119880	0,139968
bod 9	101,991	103,786	102,088	124,140	0,001863	0,088	0,124	1500	3,832	19,478	1,73	1,703	5,771	0,058667	0,055111	4,470	24,537	0,095040	0,144634
bod 10	102,050	104,162	102,109	124,036	0,001860	0,063	0,120	1498	4,149	18,824	1,39	1,849	5,600	0,042056	0,053476	4,852	23,808	0,068131	0,140342
bod 11	102,122	104,367	102,162	123,936	0,001859	0,049	0,121	1492	4,282	18,905	1,11	1,923	5,692	0,032842	0,054356	5,048	24,200	0,053204	0,142652
bod 12	102,106	104,638	102,140	123,844	0,001856	0,001	0,121	1491	4,569	18,893	0,02	2,055	5,700	0,000671	0,054429	5,394	24,233	0,001087	0,142843

Měřená charakteristika levého čerpadla - v našem měření B čerpadlo									Vypočítané veličiny			Přepočít na 1000 min ⁻¹				Přepočít na 1370 min ⁻¹			
	p1A [kPa]	p2A [kPa]	p1B [kPa]	p2B [kPa]	QB [l/s]	QA [l/s]	Mk [Nm]	n [min ⁻¹]	YA [J/kg]	PrB[W]	ηB [%]	YA [J/kg]	PrB[W]	QB [l/s]	Mk [Nm]	YA [J/kg]	PrA[W]	QA [l/s]	Mk [Nm]
bod 13	100,682	103,488	98,814	111,994	0,280017	0,000	0,097	1516	15,216	15,399	27,62	6,621	4,420	0,184707	0,042206	12,427	11,365	0,253049	0,110765
bod 14	101,118	103,798	99,103	112,573	0,268300	0,000	0,099	1512	15,506	15,675	26,49	6,783	4,535	0,177447	0,043304	12,730	11,661	0,243102	0,113648
bod 15	101,282	103,994	99,515	113,603	0,246898	0,000	0,099	1513	16,125	15,686	25,34	7,044	4,529	0,163184	0,043247	13,221	11,645	0,223562	0,113498
bod 16	101,519	104,198	100,226	115,776	0,202264	0,000	0,104	1508	17,587	16,423	21,62	7,734	4,789	0,134127	0,045733	14,516	12,315	0,183754	0,120022
bod 17	101,975	104,901	100,726	118,122	0,158399	0,000	0,108	1506	19,433	17,032	18,04	8,568	4,987	0,105179	0,047618	16,082	12,822	0,144095	0,124969
bod 18	102,262	104,579	101,450	119,324	0,131237	0,000	0,114	1512	19,910	18,050	14,45	8,709	5,222	0,086797	0,049866	16,346	13,427	0,118912	0,130867
bod 19	101,851	104,783	101,385	120,200	0,123713	0,000	0,114	1509	20,852	18,015	14,29	9,157	5,243	0,081983	0,050064	17,187	13,481	0,112317	0,131388
bod 20	102,050	105,312	102,284	121,059	0,089225	0,000	0,119	1507	20,811	18,780	9,87	9,164	5,487	0,059207	0,052399	17,200	14,109	0,081114	0,137515
bod 21	102,267	105,312	101,710	120,526	0,100256	0,000	0,120	1504	20,852	18,900	11,04	9,218	5,555	0,066659	0,053050	17,302	14,285	0,091323	0,139224
bod 22	102,264	105,091	101,858	120,866	0,109035	0,000	0,112	1499	21,045	17,581	13,03	9,366	5,220	0,072739	0,049844	17,578	13,422	0,099652	0,130811
bod 23	102,200	105,236	102,369	124,010	0,012071	0,000	0,128	1497	23,677	20,066	1,42	10,565	5,981	0,008063	0,057117	19,830	15,380	0,011047	0,149898
bod 24	102,251	105,097	102,281	124,424	0,004575	0,000	0,131	1503	24,180	20,619	0,54	10,704	6,073	0,003044	0,057990	20,090	15,615	0,004170	0,152189

Průtokoměr pravého čerpadla plně otevřený, průtok levého čerpadla se mění									Vypočítané veličiny			Přepočít na 1000 min ⁻¹							
	p1A [kPa]	p2A [kPa]	p1B [kPa]	p2B [kPa]	QB [l/s]	QA [l/s]	Mk [Nm]	n [min ⁻¹]	YA [J/kg]	Pr [W]	ηA [%]	YA [J/kg]	ηB [%]	YA [J/kg]	Mk [Nm]	Pr [W]	QA [l/s]	YA [J/kg]	QB [l/s]
bod27	100,492	101,956	99,097	114,108	0,221166	0,111	0,105	1516	4,171	16,669	2,77	17,719	23,47	1,815	0,046	4,784	0,073219	7,710	0,145888
bod28	100,680	102,065	99,640	115,568	0,190859	0,118	0,108	1518	4,093	17,168	2,81	18,636	20,68	1,776	0,047	4,908	0,077734	8,088	0,125730
bod29	100,823	102,153	99,988	116,884	0,168908	0,124	0,109	1512	4,039	17,259	2,90	19,603	19,15	1,767	0,048	4,993	0,082011	8,575	0,111711
bod30	100,954	102,213	100,302	117,878	0,148574	0,128	0,112	1508	3,967	17,687	2,87	20,283	17,01	1,744	0,049	5,158	0,084881	8,919	0,098524
bod31	101,623	102,644	101,920	124,151	0,001859	0,152	0,128	1509	3,728	20,227	2,80	24,938	0,23	1,637	0,056	5,887	0,100729	10,952	0,001232

Průtokoměr levého čerpadla plně otevřený, průtok pravého čerpadla se mění									Vypočítané veličiny			Přepočít na 1000 min ⁻¹							
	p1A [kPa]	p2A [kPa]	p1B [kPa]	p2B [kPa]	QB [l/s]	QA [l/s]	Mk [Nm]	n [min ⁻¹]	YA [J/kg]	Pr [W]	ηA [%]	YA [J/kg]	ηB [%]	YA [J/kg]	Mk [Nm]	Pr [W]	QA [l/s]	YA [J/kg]	QB [l/s]
bod 32	100,0899	101,6672	97,98752	111,3472	0,274685	0,097	0,099	1522	3,614	15,779	2,22	16,067	27,92	1,560	0,043	4,475	0,063732	6,936	0,180476
bod 33	100,1222	101,7332	98,02418	111,3533	0,274777	0,093	0,1	1518	3,647	15,896	2,13	16,037	27,67	1,583	0,043	4,544	0,061265	6,959	0,181013
bod 34	100,284	102,0661	98,15547	111,4787	0,276477	0,08	0,1	1518	3,819	15,896	1,92	16,031	27,83	1,657	0,043	4,544	0,052701	6,957	0,182133
bod 35	100,4918	102,6724	98,24086	111,9777	0,283619	0,057	0,106	1547	4,217	17,172	1,40	16,444	27,11	1,762	0,044	4,638	0,036846	6,871	0,183335
bod 36	100,5759	102,8225	98,32507	111,9409	0,283360	0,048	0,103	1559	4,283	16,816	1,22	16,323	27,46	1,762	0,042	4,438	0,030789	6,716	0,181758
bod 37	100,6299	102,9028	98,39511	111,8569	0,282362	0,004	0,105	1531	4,309	16,834	0,10	16,169	27,07	1,839	0,045	4,691	0,002613	6,898	0,184430

Nejistoty

Nejistoty měření								
	uBp1A [-]	uBp2A [-]	uQA [-]	un [-]	uMk [-]	uBYA [-]	uPrA [-]	uηA [-]
bod 3	254,008	256,534	4,5300E-07	0,024950	0,02	0,361664	3,135365	0,002924
bod 4	254,019	256,620	4,4400E-07	0,025033	0,02	0,361732	3,145837	0,002857
bod 5	254,067	256,745	4,3200E-07	0,024950	0,02	0,361855	3,135364	0,002813
bod 6	254,184	257,005	4,1400E-07	0,024900	0,02	0,362123	3,129080	0,002727
bod 7	254,390	257,564	3,8100E-07	0,024950	0,02	0,362666	3,135363	0,002508
bod 8	254,687	258,484	3,3300E-07	0,025000	0,02	0,363531	3,141649	0,002138
bod 9	254,977	259,466	2,6400E-07	0,025000	0,02	0,364435	3,141653	0,001644
bod 10	255,124	260,404	1,8900E-07	0,024967	0,02	0,365210	3,137460	0,001220
bod 11	255,305	260,918	1,4700E-07	0,024867	0,02	0,365705	3,124895	0,000946
bod 12	255,264	261,595	3,0000E-09	0,024850	0,02	0,366161	3,122800	0,000019

Nejistoty měření								
	uBp1B [-]	uBp2B [-]	uQB [-]	un [-]	uMk [-]	uBYB [-]	uPrB [-]	uηB [-]
bod 13	247,036	279,986	8,4005E-07	0,025267	0,02	0,374061	3,175140	0,016339
bod 14	247,758	281,432	8,0490E-07	0,025200	0,02	0,375627	3,166764	0,014887
bod 15	248,787	284,009	7,4069E-07	0,025217	0,02	0,378247	3,168859	0,013640
bod 16	250,565	289,441	6,0679E-07	0,025133	0,02	0,383520	3,158391	0,009754
bod 17	251,814	295,305	4,7520E-07	0,025100	0,02	0,388792	3,154205	0,006774
bod 18	253,626	298,310	3,9371E-07	0,025200	0,02	0,392260	3,166777	0,004489
bod 19	253,462	300,500	3,7114E-07	0,025150	0,02	0,393829	3,160494	0,004343
bod 20	255,709	302,646	2,6768E-07	0,025117	0,02	0,396924	3,156309	0,002442
bod 21	254,276	301,314	3,0077E-07	0,025067	0,02	0,394978	3,150027	0,002849
bod 22	254,645	302,165	3,2711E-07	0,024983	0,02	0,395868	3,139547	0,003794
bod 23	252,924	310,025	3,6213E-08	0,024950	0,02	0,402736	3,135374	0,000244
bod 24	255,703	311,060	1,3724E-08	0,025050	0,02	0,403395	3,147943	0,000089

Nejistoty měření													
	uBp1A [-]	uBp2A [-]	uBp1B [-]	uBp2B [-]	uQA [-]	uQB [-]	un [-]	uMk [-]	uBYA [-]	uBYB [-]	uPr [-]	uηA [-]	uηB [-]
bod27	251,230	254,890	247,742	285,271	3,3300E-07	6,6350E-07	0,001516	0,02	0,358535	0,378511	3,175103	0,002385	0,005030
bod28	251,700	255,163	249,099	288,921	3,5400E-07	5,7258E-07	0,001518	0,02	0,359061	0,382167	3,179292	0,002466	0,004250
bod29	252,056	255,384	249,971	292,209	3,7200E-07	5,0672E-07	0,001512	0,02	0,359469	0,385234	3,166726	0,002581	0,003769
bod30	252,385	255,533	250,755	294,695	3,8400E-07	4,4572E-07	0,001508	0,02	0,359807	0,387639	3,158348	0,002602	0,003254
bod31	254,059	256,609	254,801	310,377	4,5600E-07	5,5781E-09	0,001509	0,02	0,361752	0,402293	3,160442	0,002715	0,000037

Nejistoty měření													
	uBp1A [-]	uBp2A [-]	uBp1B [-]	uBp2B [-]	uQA [-]	uQB [-]	un [-]	uMk [-]	uBYA [-]	uBYB [-]	uPr [-]	uηA [-]	uηB [-]
bod 32	250,225	254,168	244,969	278,368	2,9100E-07	8,2405E-07	0,001522	0,02	0,357314	0,371476	3,187669	0,002194	0,006489
bod 33	250,306	254,333	245,060	278,383	2,7900E-07	8,2433E-07	0,001518	0,02	0,357488	0,371549	3,179292	0,002089	0,006444
bod 34	250,710	255,165	245,389	278,697	2,4000E-07	8,2943E-07	0,001518	0,02	0,358367	0,372002	3,179292	0,001801	0,006495
bod 35	251,229	256,681	245,602	279,944	1,7100E-07	8,5086E-07	0,001547	0,02	0,359815	0,373082	3,240029	0,001192	0,006185
bod 36	251,440	257,056	245,813	279,852	1,4400E-07	8,5008E-07	0,001559	0,02	0,360231	0,373151	3,265162	0,001027	0,006316
bod 37	251,575	257,257	245,988	279,642	1,2000E-08	8,4708E-07	0,001531	0,02	0,360470	0,373109	3,206519	0,000085	0,006285